

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний  
(повна назва інституту/факультету)

Приладів і систем орієнтації та навігації  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 531.383

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
Бурау Н.І.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і назва спеціальності)

на тему: Використання додаткової інформації для підвищення точності приладів орієнтації і навігації

Виконав : студент 6 курсу, групи ПГ-71мп  
(шифр групи)

Кльосов Юрій Ігорович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Мироненко П.С. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант Розр. стартап-проекту доц., к.є.н. Бояринова К.О. \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент ст. викл. Божко К. М. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

## РЕФЕРАТ

Дисертаційна робота складається з 110 сторінок, з яких основна частина - 86 сторінок; в ній міститься 33 рисунки та 28 таблиць.

Інформаційно-вимірювальні системи СОН призначені для вимірювання і розрахунку необхідної інформації, в тому числі прискорень, кутових і лінійних швидкостей і переміщень об'єктів, збору, подальшій обробці, візуалізації вихідних даних, одержуваних з вимірювальних приладів та формування команд управління.

Розробка систем для орієнтації та навігації і для подальшого управління рухом об'єктів пов'язана з неперервним покращенням характеристик цих систем – їх мініатюризація, зниження собівартості, енергоспоживання, тощо. Для зниження енергоспоживання та зменшення масо-габаритних характеристик створюють МЕМС гіроскопи, акселерометри, датчики тиску, тощо. Їх поява привела до революційних змін в інерційних технологіях вимірювання.

### **Актуальність теми**

Інформаційно-вимірювальні системи СОН використовують для: вимірювання різних фізичних параметрів руху об'єктів, таких як лінійного прискорення, кутових і лінійних швидкостей і переміщень; збору та обробки інформації, одержуваної з інших вимірювальних приладів; вироблення команд корекції та управління.

Перелік завдань, що вирішуються такими системами, розширюється з кожним роком. Разом з тим, зростають і вимоги до них по розширенню діапазону вимірювань, точності визначення параметрів, мінімізації габаритів і енергоспоживання, особливо, в реальних умовах експлуатації.

**Метою** дисертаційної роботи є підвищення інформаційно-вимірювальних характеристик мікромеханічних гіроскопів RR-типу, розробка рішень, методів аналізу і синтезу механічної, електричної, структурної та алгоритмічної підсистем з метою підвищення точності приладів даного типу в умовах вібраційних збурень.

**Об'єкт дослідження** – мікромеханічні гіроскопи RR-типу, які використовуються в інформаційно-вимірювальних системах для вирішення завдань орієнтації і навігації.

**Предметом дослідження** є електромеханічні процеси, що відображають особливості схемних реалізацій мікромеханічних гіроскопів, взаємозв'язок параметрів цих приладів з їх похибкою в умовах вібраційних збурень.

**Методи дослідження** ґрунтуються на числових методах розв'язання систем диференціальних рівнянь та теорії нелінійних коливань динамічних систем.

**Наукова новизна** – розробка методу компенсації вібраційної похибки в мікромеханічному гіроскопі RR-типу по створеній математичній моделі цієї похибки за допомогою методів надлишкових вимірювань в реальному часі.

**Практична цінність** дисертаційної роботи в тому, що розроблений алгоритм компенсації може бути використаний при проектуванні мікромеханічних гіроскопів, які працюють в умовах вібраційних збурень.

**Задачі дослідження:**

1. Здійснення пошуку схемно-конструктивних рішень по виконанню мікромеханічних гіроскопів, адаптованих до умов роботи з підвищеним рівнем збурюючих впливів. Аналіз роботи чутливого елемента в умовах обраних збурень (вібрації).

2. Побудова узагальненої математичної моделі похибки приладу в умовах вібрації. Проведення аналізу з метою визначення можливості використання додаткової інформації для формування компенсації вібраційної похибки.

3. Побудова математичної моделі мікромеханічного гіроскопу з системою корекції похибки для проведення імітаційного моделювання. Проведення імітаційного моделювання та аналіз отриманих результатів на предмет підвищення ефективності від їх застосування. Вироблення напрямків можливих подальших досліджень.

**Публікації:** 1) Інтелектуалізація датчиків систем орієнтації і навігації / Кльосов Ю. І., Д. В. Чаплинська, Мироненко П. С. // Ефективність інженерних

рішень у приладобудуванні: збірник праць конференції, 4-5 грудня 2018р., м. Київ, Україна. – 2018. – С. 19-21.

## РЕФЕРАТ

Диссертационная работа состоит из 110 страниц, из которых основная часть - 86 страниц содержит 33 рисунка и 28 таблиц.

Информационно-измерительные системы предназначены для измерения и расчета необходимой информации, в том числе ускорений, угловой и линейной скорости и перемещений объектов, сбора, дальнейшей обработки и визуализации выходных данных, получаемых с измерительных приборов, и дальнейшее формирование команд управления.

Разработка систем для ориентации и навигации и дальнейшего управления движением объектов связана с улучшением характеристик этих систем - их миниатюризация, снижение себестоимости, энергопотребления и т.д. Для снижения энергопотребления и уменьшение массогабаритных характеристик создают микромеханические гироскопы, акселерометры, датчики давления и т.д. Их появление привело к революционным изменениям в области инерционных технологий.

### **Актуальность темы**

Информационно-измерительные системы СОН используют для: измерения разных физических параметров движения объектов, таких как линейного ускорения, угловой и линейной скорости и перемещений; сбора и обработка информации, получаемой из других измерительных приборов, формирования команд коррекции и управления.

Перечень задач, которые решаются такими системами, расширяется каждый год. Вместе с тем, растут и требования к ним по расширению диапазона измерений, точности определения параметров, минимизации габаритов и энергопотребления, особенно, в реальных условиях эксплуатации.

**Целью** диссертационной работы является повышение информационно-измерительных характеристик микромеханических гироскопов RR-типа, разработка методик анализа и синтеза механической, электрической, структурной и

алгоритмической подсистем с целью повышения точности приборов данного типа в условиях вибрационных возмущений.

**Объект исследования** – микромеханические гироскопы RR-типа, которые используют в информационно-измерительных системах для решения задач ориентации и навигации.

**Предметом исследования** является электромеханические процессы, которые отображают особенности схемных реализаций микромеханических гироскопов, взаимосвязь параметров этих приборов с их ошибкой в условиях вибрационных возмущений.

**Методы исследования** основаны на числовых методах решения систем дифференциальных уравнений и теории нелинейных колебаний динамических систем.

**Научная новизна** – разработка метода компенсации вибрационной ошибки в микромеханических гироскопах RR-типа по созданной математической модели этой ошибки с помощью методов избыточных измерений в реальном времени.

**Практическая ценность** диссертационной работы состоит в том, что созданные математические модели и алгоритмы могут быть использованы при проектировании гироскопов, работающих в условиях вибрации.

**Задачи исследования:**

1. Осуществление поиска схематически-конструктивных решений в исполнении микромеханических гироскопов, адаптированных к условиям работы в условиях вибрации. Проведение анализа работы чувствительного элемента этих приборов в условиях вибрации.

2. Построение обобщенной математической модели ошибки прибора в условиях вибрации. Проведение анализа с целью определения возможности использования дополнительной информации для формирования сигнала компенсации вибрационной ошибки.

3. Построение математической модели микромеханического гироскопа с системой коррекции ошибки для проведения имитационного моделирования. Проведение имитационного моделирования и анализ полученных результатов на

предмет повышения эффективности от их применения. Выбор направлений возможных дальнейших исследований.

**Публикации:** 1) Интеллектуализация датчиков систем ориентации и навигации / Клёсов Ю. И., Чаплинская Д. В., Мироненко П.С. // Эффективность инженерных решений в приборостроении: сборник трудов конференции, 4-5 декабря 2018г., г. Киев, Украина. - 2018. - С. 19-21.

## ABSTRACT

The thesis work consists of 110 pages, of which the main part 86 pages it contains 33 drawings and 28 tables.

Information and measuring systems are designed to measure and calculate the necessary information, including accelerations, angular and linear speeds and displacements of objects, collection, further processing and visualization of the output data obtained from measuring instruments and the further development of control commands.

Development of systems for orientation and navigation and for further control of the movement of objects, associated with the continuous improvement of the characteristics of these systems - their miniaturization, cost reduction, power consumption, etc. To reduce energy consumption and reduce weight and size characteristics create micromechanical gyroscopes, accelerometers, pressure sensors, etc. Their appearance led to revolutionary changes in the field of inertial technologies.

### **Relevance of the topic**

SON information and measuring systems are used to: measure various physical parameters of the movement of objects, such as linear acceleration, angular and linear velocity, and displacements; collection and processing of information obtained from other measuring instruments; drawing up correction and control commands.

The list of tasks that are solved by such systems are expanded every year. At the same time, the requirements for them to expand the range of measurements, the accuracy of determining the parameters, minimizing dimensions and energy consumption, especially in real operating conditions, are also growing.

**The aim** of the thesis is to improve the information and measurement characteristics of RR-type micromechanical gyroscopes, to develop solutions, methods for analyzing and synthesizing mechanical, electrical, structural and algorithmic subsystems in order to improve the accuracy of this type of instrument under vibration disturbances.

**The object** of study is RR-type micromechanical gyroscopes, which are used in information-measuring systems for solving orientation and navigation problems.



**The subject** of the research is electromechanical processes, which reflect the features of circuit realizations of micromechanical gyroscopes, the interrelation of the parameters of these devices with their error under the conditions of vibration disturbances.

**Research methods** are based on numerical methods for solving systems of differential equations and the theory of nonlinear oscillations of dynamic systems.

**Scientific novelty** – compensation of vibration error in RR-type micromechanical gyroscopes, according to the mathematical model of this error, using the methods of redundant measurements in real time.

**The practical value** of the thesis is that the created mathematical models and algorithms can be used in the design of gyroscopes with additional information about the movement of the sensitive element.

**Objectives of the study:**

1. The search for a schematic design solution in the performance of micromechanical gyroscopes, adapted to the conditions of work in vibration conditions. Analyzing the operation of the sensitive element in the conditions of vibration.

2. Construction of a generalized mathematical model of the error of the device in terms of vibration. Analysis to determine the possibility of using additional information to form a compensation for the vibration error.

3. Construction of a mathematical model of a micromechanical gyroscope with an error correction system for simulation. Conducting simulation and analysis of the results to improve the effectiveness of their use. The choice of directions for further research.

**Publications:** 1) Intellectualization of sensors of orientation and navigation systems / Klosov Y.I., Chaplinskaya D.V., Mironenko P.S. // Efficiency of engineering solutions in instrument making: a collection of conference proceedings, December 4-5, 2018, Kiev, Ukraine. - 2018. - p. 19-21.

## ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	15
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЧІВ СОН В УМОВАХ ІНЕРЦІЙНИХ ЗБУРЕНЬ	19
1.1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЛУЗІ.....	19
1.2. ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	21
1.3. НАДЛИШКОВІСТЬ ЯК ЗАСІБ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ПРИЛАДІВ СОН.....	30
1.4. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ПО ВИКОРИСТАННЮ ІНФОРМАЦІЙНО-НАДЛИШКОВИХ ДАТЧИКІВ .....	36
1.5. МІКРОМЕХАНІЧНІ ГІРОСКОПИ.....	43
1.5.1. Види мікромеханічних гіроскопів .....	44
Висновки до розділу.....	51
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ММГ RR-ТИПУ.....	52
2.1. Виведення рівнянь руху ММГ RR-типу .....	52
2.2. Вплив лінійної вібрації основи на ММГ .....	57
Висновки до розділу.....	61
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПУ RR-ТИПУ ПРИ ДІЇ ВІБРАЦІЙНИХ ЗБУРЕНЬ .....	62
3.1 Розробка математичних моделі ММГ .....	62
3.2. Оцінка на адекватність програмної моделі руху ЧЕ ММГ .....	65
3.3. Дослідження програмної моделі ММГ RR-типу в умовах лінійної вібрації ...	74
3.4. Проведення досліджень ММГ RR-типу з контуром компенсації вібрації.....	81
Висновки до розділу.....	85
ВИСНОВКИ.....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	88
ДОДАТОК А .....	93



## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ВП	– вимірювальний перетворювач
ВК	– вимірювальний канал
ЗВ	– засіб вимірювання
ІТ	– інерційне тіло (маса)
МЕМС	– мікроелектромеханічні системи
ММГ	– мікромеханічний гіроскоп
НВ	– надлишковий вимірювач
КФВ	– коригуюча фізична величина
ПАЗ	– програмно-алгоритмічного забезпечення
РР	– режим руху
РЧ	– режим чутливості
ТНВ	– теорія надлишкових вимірювань
ФП	– функціональний перетворювач
ФВ	– фізична величина
ЧЕ	– чутливий елемент

## ВСТУП

### Актуальність теми

Інформаційно-вимірювальні системи СОН використовують для:

- вимірювання різних фізичних параметрів руху об'єктів, таких як лінійного прискорення, кутових і лінійних швидкостей і переміщень;
- збору та обробки інформації, одержуваної з інших вимірювальних приладів;
- вироблення команд корекції та управління.

Перелік завдань, що вирішуються такими системами, розширюється з кожним роком. Разом з тим, зростають і вимоги до них по розширенню діапазону вимірювань, точності визначення параметрів, мінімізації габаритів і енергоспоживання, особливо, в реальних умовах експлуатації.

Сучасні вимірювальні прилади СОН, як правило, складаються з трьох основних частин: блоку чутливих елементів, блоків електроніки та мікроконтролерів, що реалізують процес вимірювання, обробку та формування вихідних сигналів в залежності від виконуваного функціонального завдання. Розробкою алгоритмів функціонування інформаційно-вимірювальних систем та визначення параметрів руху об'єктів займаються вже досить давно і, на сьогоднішній день, можна сказати, що похибка вихідних сигналів даних систем визначається в основному похибкою показань чутливих елементів.

В даний час блоки ЧЕ інформаційно-вимірювальних і управляючих систем визначення параметрів руху, будуються на базі гіроскопів і акселерометрів, як традиційного виконання, так і у вигляді мікро-електро-механічних систем.

На сьогодні масогабаритні характеристики мікромеханічних приладів цілковито задовольняють сучасним тенденціям розвитку інформаційно-вимірювальних систем. Проводяться величезні роботи по освоєнню даного напрямку. Проте вони ускладнені тим, що перехід від традиційних приладів точної механіки до мікромеханіки не допускає формальної заміни одних на інші. Це

пов'язано з тим, що мікромеханічні акселерометри і гіроскопи, на даному етапі розвитку, мають більш низьку стабільність масштабного коефіцієнту, більшу нелінійність вихідної характеристики, підвищений рівень шумів і більш вузький діапазон вимірювання.

Виходячи з цього, розробка математичних моделей, що враховують особливості процесів, що протікають в мікромеханічних приладах, і створенню на їх базі методик синтезу мікромеханічних приладів з поліпшеними характеристиками є актуальною.

**Метою** дисертаційної роботи є підвищення інформаційно-вимірювальних характеристик мікромеханічних гіроскопів RR-типу, розробка рішень, методів аналізу і синтезу механічної, електричної, структурної та алгоритмічної підсистем з метою підвищення точності приладів даного типу в умовах вібраційних збурень.

**Об'єкт дослідження** – мікромеханічні гіроскопи RR-типу, які використовуються в інформаційно-вимірювальних системах для вирішення завдань орієнтації і навігації.

**Предметом дослідження** є електромеханічні процеси, що відображають особливості схемних реалізацій мікромеханічних гіроскопів, взаємозв'язок параметрів цих приладів з їх похибкою в умовах вібраційних збурень.

**Практичною цінністю** магістерської дисертаційної роботи є створення математичних моделей та алгоритмів, які можуть бути використані для проектування мікромеханічних гіроскопів RR-типу з контуром корекції за додатковою інформацією про рух чутливого елемента.

**Публікації:** 1) Інтелектуалізація датчиків систем орієнтації і навігації / Кльосов Ю. І., Д. В. Чаплинська, Мироненко П. С. // Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні: збірник праць конференції, 4-5 грудня 2018р., м. Київ, Україна. – 2018. – С. 19-21.

**Задачі дослідження:**

1. Здійснення пошуку схемно-конструктивних рішень по виконанню мікромеханічних гіроскопів, адаптованих до умов роботи з підвищеним рівнем

збурюючих впливів. Проведення аналізу роботи чутливого елемента в умовах обраних збурень (вібрації).

2. Побудова узагальненого математичної моделі похибки приладу в умовах вібрації. Проведення аналізу з метою визначення можливості використання додаткової інформації для формування компенсації вібраційної похибки.

3. Побудова математичної моделі мікромеханічного гіроскопу з системою корекції похибки для проведення імітаційного моделювання. Проведення імітаційного моделювання та аналіз отриманих результатів на предмет підвищення ефективності від їх застосування. Вироблення напрямків можливих подальших досліджень.

## **РОЗДІЛ 1. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЧІВ СОН В УМОВАХ ІНЕРЦІЙНИХ ЗБУРЕНЬ**

### **1.1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЛУЗІ**

Приладобудування грає важливу роль в розвитку технічного прогресу – це проявляється в реалізації не тільки в безперервній появі принципово нових методів процесів виготовлення виробів, але й в неперервній зміні існуючих технологій виробництва більш точними та економнішими.

На сьогодні приладобудівна галузь розвивається дуже швидкими темпами. В даний час вироби приладобудування потребують підвищення точності, розширення виконуваних функцій і інтенсифікація роботи, тобто підвищення продуктивності, швидкохідності, і інших показників. Тому вироби (машини, механізми і т. д.) модернізуються, в їх склад вводяться нові деталі і вузли, удосконалюється технологія виготовлення деталей машин. Морально застарілі вироби замінюються принципово новими, які, як правило, конструктивно складніші застарілих виробів, а також розробляються вироби, що не мають аналогів в практиці приладобудування.

При цьому, як і раніше, найважливішими завданнями приладобудування є підвищення надійності і довговічності, зниження собівартості виготовлення приладів, тощо. Вирішення поставлених завдань ускладняється тим, що вироби стають більш наукомісткими, а їх експлуатаційні та якісні показники більш високими. Дослідження таких виробів, найчастіше, неможливо без використання статистичних методів математичного моделювання [9].

Перспективи сучасного приладобудування зв'язані зі створенням приладів, які володіють малою масою, невеликими габаритними розмірами, економічні в енергоспоживанні та собівартості при безумовному виконанні цільової функції з заданою точністю [8].

Для сучасного етапу розвитку приладобудування характерно широке використання нових матеріалів, конструктивно-технологічних рішень, автоматизації



та інтелектуалізації всіх етапів створення виробів. Окрім цього, швидко змінюється елементна база, впроваджуються нові принципи функціонування приладів і систем, зростають вимоги до точності, надійності виробів.

Приладобудування – це найбільш сучасний, динамічний та перспективний сектор промисловості, який визначає загальний рівень технічного розвитку країни.

Задачею приладобудівної галузі є створення приладів і пристосувань для контролю і виготовлення різних деталей з високою точністю, якістю і зручністю у використанні.

Сучасний рівень розвитку науки та техніки дозволяє вирішувати складні задачі, які поставлені перед приладобудуванням, а саме: підвищення вимог до технічних параметрів та техніко-експлуатаційних характеристик продукції, висока економічність виробництва приладів і ефективність використання автоматизованого обладнання.

Ще у семи десятих роках минулого століття уряд прийняв постанову про розвиток мікроелектронної промисловості, і з того часу почалися науково-технічні розробки в області мініатюрних датчиків і виконуючих пристроїв різного призначення на базі кремнію – основного матеріалу мікроелектроніки. Єдність матеріалу і технології мікроелектроніки дозволило створювати мініатюрні конструкції на одному кристалі, що об'єднує чутливі елементи, які перетворюють і електронні компоненти, які прийнято називати *мікроелектромеханічними системами* (MEMS).

MEMS – технології і пристрої поєднують в собі мікроелектронні і мікромеханічні компоненти. MEMS визначає одне з перспективних напрямлень розвитку приладобудування XXI століття, яке тягне за собою докорінну зміну промислових і споживчих виробів з безпрецедентним діапазоном застосування. У вітчизняній науково-технічній літературі для позначення мікросистем, в складі чутливих і виконавчих пристроїв, якими є механічні рухливі елементи, застосовується термін «*мікромеханічні прилади*». Відмінною ознакою цих приладів є їх застосування в області вимірювання механічних величин.

На сьогоднішній день мікромеханічним вимірювальними приладами, що найбільш динамічно розвиваються є гіроскопи, акселерометри та датчики тиску.

Розробка систем управління перспективними динамічними об'єктами потребують вивчення нових підходів до їх проектування, створення нової концепції, модернізації алгоритмічного забезпечення, створення нової елементної бази.

Гіроскопи і акселерометри відносяться до класу інерційних датчиків, діапазон застосування яких досить широкий: від подушок безпеки і антиблокувальних автомобільних пристроїв до інтегрованих з супутниковими навігаційними системами малогабаритних інерційних навігаційних систем, що забезпечують визначення параметрів орієнтації і координат літальних апаратів, надводних і підводних апаратів, наземних транспортних засобів, роботів та ін. Тому займатись розробкою програмного забезпечення для підвищення точності та стійкості цих приладів до різного роду збурень є перспективним напрямком роботи.

## **1.2. ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ**

В даний час інтелектуальні інформаційні технології все глибше проникають у всі сфери науково-технічної діяльності людського суспільства. Центральною їх ланкою є технології інженерних знань, включаючи процеси управління знаннями, тому успіхи даного напрямку багато в чому визначаються інтелектуальним рівнем і загальною ефективністю комп'ютерних систем. На жаль, багато ідей цього розділу штучного інтелекту сьогодні так і залишаються не реалізованими повністю або частково з ряду причин.

*Першою причиною* є недостатнє розуміння дослідниками принципів і механізмів сприйняття, відображення, усвідомлення і обробки інформації / знань в мозку людини і, як наслідок, відповідні комп'ютерні методи і алгоритми не досконалі. Не викликає сумніву той факт, що інтелектуальні інформаційні технології і відповідні комп'ютерні системи будуть і надалі інтенсивно розвиватися в напрямках, що відповідають найбільш істотним ознаками розумної діяльності, в тому числі розпізнавання, перетворення і розуміння знакових систем. Результатом зазначених комплексних завдань є генерація сукупного сенсу, закладеного в зміст

аналізованих знакових системах. При цьому під змістом розуміється те, що робить знакову систему текстом, а останній - джерелом знань.

*Другою причиною є недостатня ефективність більшості сучасних комп'ютерних систем: останні в процесі управління знаннями повинні оперувати примітивними даними (в традиційному розумінні), знаннями, представленими в відповідній формальній теорії. Розробка і використання нових інформаційних технологій, таких як суперкомп'ютерні і GRID-обчислення, багатоагентні системи та ін. зі свого боку, також вимагають знання орієнтованого підходу. Орієнтація на апаратну підтримку (реалізацію) основних процедур маніпулювання знаннями на базі сучасних мікроелектронних технологій (наприклад, ПЛІС-технології, РІМ-технології) із застосуванням відповідних САПР допоможе в значній мірі підвищити ефективність сучасних комп'ютерних систем.*

Сучасні датчики, які є найважливішими частинами мікропроцесорних систем управління технологічними об'єктами і виробництвом в цілому, з однофункціональних засобів визначення поточних значень вимірюваних величин поступово перетворюються в багатофункціональні засоби автоматизації, які вирішують ще цілий ряд завдань з діагностики, перетворення вимірювальної інформації, виконання простих алгоритмів управління і т. д.

Інтелектуальні датчики можна розділити на 4 підтипи:

- *інтелектуальні ,*
- *інтелектні,*
- *інтелектуалізовані,*
- *майже інтелектуальні.*

*Інтелектні - це просто лексична форма інтелектуальних датчиків.*

Про штучний інтелект, системи штучного інтелекту, інтелектуальні системи та про інтелектуалізовані системи пишуть і говорять часто. Багато з того, що вчора називали загальними та спеціальними термінами, сьогодні називають інтелектуальним. Практично будь-який створений, а точніше виготовлений на ринок інформаційний або технічний об'єкт оголошується інтелектуальною системою,

правда, в основному в ЗМІ, та рекламних матеріалах. Насправді це частково мода, а частково широке наукове та практичне усвідомлення інтелектуальності, як однієї з важливих характеристик оточуючого нас світу.

Найбільш значними роботами в області штучного інтелекту є розробки потужних комп'ютерних систем або експертних систем, тобто систем, заснованих на знаннях. Такі програми вирішення завдань з поданням і застосуванням фактичних і евристичних знань, спільною роботою експертів і інженерів по знаннях, розробників систем і логічним висновком дозволяють переходити до нових інформаційних технологій, до нової технології програмування.

*Інтелектуалізація* — це процес постійного збагачення знаннями, що приводить до збільшення частки інтелектуальної праці в діяльності людини (суспільства). Інтелектуальна діяльність, як один з різновидів праці, спрямована на уточнення інформації про об'єкти навколишнього світу. Можливості комп'ютера і його програмного забезпечення є засобом акумуляції знань, подальшого структурування і формалізації інформації для розробки різноманітних інтелектуальних систем, що беруть участь в підтримці і розвитку інформаційних обмінів.

*Майже інтелектуальні датчики* — інформаційні системи, недостатньо інтелектуальні, щоб справлятися з нинішніми вимогами, потребують надмірної витрати грошей в організаціях всіх типів. Ці витрати приймають різні форми, включаючи витрати на придбання непотрібних даних, витратну діяльність, упущені можливості.

Вартість інформаційних технологій в сучасних організаціях досить значна, її частка в загальних витратах постійно збільшується, але сучасні системи все ще не стали досить інтелектуальними. Причину можна зрозуміти, розглянувши програмування в бізнесі в історичній перспективі і розвиток інформаційних технологій як дисципліни. У минулому ІТ-підрозділи вважалися лідерами своїх організацій, задаючи темп застосування технології. Сьогодні потреби співробітників організацій, збагачуються зовнішнім впливом – інтернетом, і ІТ-підрозділи з працею підтримують цей темп під тягарем зростаючих запитів і необхідності підтримувати

старі системи. Засоби, технології та методи управління прийняттям рішень в організації (EDM) готові, але стримуючі фактори лежать в історії бізнес-програмування. Щоб зрозуміти, чому після стількох років, витрачених на інформаційні технології, багато систем до сих пір не є інтелектуальними, потрібно поглянути на еволюцію практичного програмування в бізнесі. Інформаційні системи, недостатньо інтелектуальні, щоб справлятися з нинішніми вимогами, потребують надмірної витрати грошей в організаціях всіх типів.

В останні роки за датчиками, в які вбудований мікропроцесор, закріпилася назва *«інтелектуальні датчики»*. В даний час словосполучення «інтелектуальних датчик» міцно увійшло в лексикон не тільки розробників інформаційно-вимірювальних систем, але і простих споживачів. Однак далеко не всі правильно розуміють його значення. Пов'язано це з тим, що і самі розробники подібних пристроїв розходяться в думках щодо його значення, і кожен вкладає в нього свій особливий сенс.

Згідно сімейства стандартів [1] під визначенням інтелектуального датчика розуміється *«адаптивний датчик з функцією метрологічного самоконтролю»*, який повинен містити «датчик, параметри і алгоритми роботи якого в процесі експлуатації здатні змінюватися в залежності від сигналів, що містяться в ньому перетворювачів». У свою чергу, в ГОСТ термін *«метрологічний самоконтроль»* розкривається як «Автоматична перевірка метрологічної справності датчика в процесі його експлуатації, здійснювана з використанням прийнятого опорного значення, який формується за допомогою вбудованого в датчик кошти (вимірювального перетворювача або заходи) або виділеного додаткового параметра вихідного сигналу». Слід зазначити, що сам термін *«датчик»* використовується тут як складовий пристрій, на відміну від його міжнародного значення *«чутливий елемент»*.

У зарубіжній літературі аналогом терміну «інтелектуальні датчики» є термін *«smart sensor»*, що закріпився в середині 1980-х, і в даний час зазвичай має на увазі датчик з інтегрованою електронікою (аналого-цифровим перетворювачем (АЦП), мікропроцесором, цифровим сигнальним процесором, системою на кристалі і т. п.),

а також реалізацією цифрового інтерфейсу і мережевих комунікаційних протоколів. Відповідно, крім наявності функцій самодіагностики і самонавчання, такий датчик повинен володіти функцією самоідентифікації, необхідної для його однозначного пізнання в мережі серед інших датчиків. Крім можливості включення датчика в мережу, наявність мережевого інтерфейсу дозволяє проводити дії по конфігурації, вибору режиму роботи і діагностики датчиків з віддаленого робочого місця, що дає переваги, як в експлуатації, так і в вартості їх обслуговування.

Невід'ємною частиною інтелектуального датчика також є можливість самонавчання і самовідновлення при виникненні одиничного збою. Такі пристрої можуть функціонувати в автономному або інтерактивному режимах, забезпечувати стабільну роботу протягом тривалих періодів часу при зміні умов експлуатації. Впровадження подібних інтелектуальних вимірювальних приладів дозволяє не тільки проводити вимірювання різноманітних величин, але і записувати в пам'ять дані ряду вимірювань, проводити їх обробку та аналіз, відображати на цифрових або графічних індикаторах і здійснювати передачу на зовнішні (периферійні) пристрої. Необхідність розширення функціональних можливостей приладу, таких як збір, реєстрація, обробка даних, а також функцій інтерфейсу оператора при необхідності отримання оперативної інформації та візуалізації результатів вимірювань тягне за собою значне ускладнення алгоритмів функціонування інтелектуальних приладів, збільшення продуктивності процесора, обсягу пам'яті програм і оперативної пам'яті.

Незважаючи на декларовану розробниками *«інтелектуальність»* такого типу датчиків, ці прилади можуть виконувати тільки набір функцій, закладених в них розробником, і, отже, більш коректно, визначаючи такого роду прилади, використовувати для них термін *«інтелектуальний прилад»*. Тут також слід зазначити, що визначення *«інтелектуальний»* датчика як датчика з вбудованим мікроконтролером є не зовсім вірним, так як в цьому випадку будь-який датчик, здатний безпосередньо включатися в будь-яку цифрову шину, може вважатися інтелектуальним. Тому доцільно ввести певні градації в, так би мовити, *«ступені інтелектуалізації»* датчиків такого типу:

1. До приладів першого типу слід віднести датчики з мінімальною *інтелектуалізацією*, тобто датчики, що мають вбудований мікропроцесор для первинної математичної обробки сигналу (лінеаризація, компенсація температурної похибки і т. д.) і перетворення сигналу первинного перетворювача в уніфікований вихідний сигнал. Формат вихідного сигналу при цьому особливого значення не має. Як вихідний сигнал може використовуватися уніфікований аналоговий сигнал (4-20мА, 0-5мА і т. д.) або цифровий (RS-485 або RS-232). В цьому випадку датчик практично реалізує тільки перший рівень моделі OSI (Open Systems Interconnection Basic Reference Model - базова еталонна модель взаємодії відкритих систем). При цьому головною його особливістю є відсутність зворотного зв'язку між ним і системою, тобто система тільки приймає вихідний сигнал датчика.

Перелічимо основні цілі впровадження датчиків подібного типу:

- підвищення точності за рахунок більш точного розрахунку вимірюваного параметра, а також передачі інформації в цифровому вигляді;
  - підвищення точності і стабільності за рахунок можливої компенсації факторів, які порушують роботу;
  - зручність інтеграції в цифрові автоматизовані системи управління технологічним процесом (АСУ ТП).
2. До другого типу можна віднести датчики, які володіють усіма особливостями, переліченими для першого типу, і при цьому забезпечують зворотний зв'язок з системою управління. Такі датчики додатково забезпечують 7-й рівень OSI (фізичний рівень - нижній рівень моделі, який визначає метод передачі даних, представлених в двійковому вигляді, від одного пристрою (комп'ютера) до іншого).
  3. До третьої «ступені інтелектуалізації» відносяться датчики, що забезпечують повнофункціональну взаємодію з іншими АСУ ТП. При цьому мається на увазі не тільки самодіагностику датчика, але і аналіз їх власних даних, даних



системи і видачу керуючих сигналів іншим учасникам системи. Мабуть, єдиним прикладом датчиків з таким рівнем інтелектуалізації є датчики з вихідним інтерфейсом FOUNDATION FieldBus. [13]

Датчики першого типу правильніше охарактеризувати як «цифрові», а не «інтелектні». Їх інтелектність (якщо можна взагалі говорити про їх «інтелектність») спрямована, в основному, тільки на те, щоб представити результати вимірювання в цифровому вигляді для зручності математичної обробки. Датчики такого типу мають мікропроцесор і здатні компенсувати нелінійність чутливого елемента і його температурний дрейф. Це має на увазі також наявність невеликої незалежної пам'яті, що зберігає параметри сенсора. Такий датчик може мати цифровий індикатор і не мати при цьому шинного перетворювача. При наявності індикатора і відсутності перетворювача його доцільно використовувати в якості ізолюваного вимірювального пристрою. Поточний вимір датчика надходить в буфер, звідки він видається за запитом (або без нього) зовнішньої керуючої системи ЗКС (тобто системи управління більш високого рівня). Природно, що для подібного режиму роботи датчик повинен розпізнавати адресовані до нього запити, тобто мати власний ідентифікатор. Ідентифікатор може задаватися вручну (наприклад, за допомогою мікроперемикачів) або за допомогою спеціальної команди ЗКС. Шинний перетворювач приводить сигнал до вигляду, необхідному для передачі по каналах зв'язку. Єдиними командами, які зобов'язані розуміти ці датчики, є запит на отримання даних і команда на установку адреси.

Типовими представниками датчиків другого типу є датчики, які використовують 7-й рівень моделі OSI. Принциповою відмінністю таких датчиків від датчиків попереднього типу є те, що вони здатні вести діалог з системою управління. Саме такі датчики і можуть вже в певному сенсі вважатися інтелектними.

Наприклад, відома американська корпорація Honeywell, яка виробляє електронні системи управління і автоматизації, дотримується аналогічної визначення інтелектності приладів: «Ми називаємо «інтелектним» прилад, який за допомогою сенсора на кремнієвій основі і мікропроцесорної технології забезпечує:



- можливість двостороннього обміну цифровою інформацією при налаштуванні і експлуатації датчика;
- діагностику датчика і електроніки;
- зміна діапазону вимірювань в широких межах;
- стабільний результат вимірювань при змінних режимах роботи »[14].

Датчик здатний не тільки видавати поточне вимірювання, а й коригувати власні налаштування і проводити самодіагностику. Інтелектні пристрої можуть передавати інформацію не тільки про свій стан, а й про стан обладнання, до якого вони підключені. З метою реалізації взаємодії з користувачем датчики зобов'язані підтримувати стандартизований набір команд. Такий підхід спрощує побудова системи управління, але обмежує можливості розробника по реалізації нестандартних функцій взаємодії приладів. Власне, це є не обмеженням датчика, а обмеженням всього комплексу управління, який накладається на нього стандартом OSI (як і будь-який стандарт, він за своєю суттю обмежений).

Протоколи FF і LonTalk, що дозволяють створювати призначені для користувача програми роботи датчиків, завантажувати їх в ПЗУ датчиків і запускати на виконання, були якраз розроблені в якості спроби подолання обмеження приладів *«другого рівня інтелектуалізації»*. Саме можливість зміни програми функціонування дозволяє реалізувати на основі датчиків *«третього рівня інтелектуалізації»* своєрідні мікрокеруючі центри, розподілені по всій системі управління. Наявність інтелектності такого типу у датчика дозволяє реалізувати основну концепцію відкритих систем - доступ до вимірювання, як до внутрішньої змінної програми користувача, безвідносно до типу датчика, його виробника і платформ, на яких реалізована АСУ.

З порівняння структур побудови датчиків всіх трьох рівнів можна зробити висновок, що вони відрізняються тільки можливостями процесора електронного модуля. Однак ця різниця визначає і відмінність в схемі побудови АСУ ТП і у вимогах до програмного забезпечення. Це означає, що тільки узгоджене

проектування системи управління і датчиків дозволить повністю реалізувати всі їх можливості[13].

Аналізуючи визначення з цих та інших джерел, можна виділити наступні загальні фактори *«інтелектуальності»*, починаючи з найбільш суттєвих:

1. Наявність обчислювального блоку (мікроконтролера, мікропроцесора) в датчику і первинна обробка даних в самому датчику;
2. Виконання обчислювальним блоком коригуючої функції (зниження впливу зовнішніх факторів);
3. Виконання обчислювальним блоком інших додаткових функцій, в числі яких - статистична обробка даних, калібрування і самодіагностика, зберігання даних, перетворення даних до різних форматів передачі на наступний рівень.

Необхідно відзначити, що для подальшої обробки даних і інтеграції датчиків в вимірювальні системи і комплекси, видача вимірювальних даних в цифровому вигляді є вельми бажаною. Крім того, завдяки розвитку напівпровідникової промисловості, обчислювальні потужності зростають, а споживана електрична потужність знижується, що створює передумови для розширення виконуваних датчиками функцій.

Ґрунтуючись на всьому вищесказаному, пропонується наступне формулювання визначення *«інтелектуальний датчик»*.

*Інтелектуальний датчик* - перетворювач, що містить один або кілька первинних перетворювачів і оснащений АЦП для подання даних вимірювань в цифровому вигляді і обчислювальним блоком для корекції вимірюваного значення з урахуванням факторів, що впливають і виконання додаткових функцій: обробки, перетворення, зберігання і передачі даних.

*«Інтелектуальні датчики»* - це пристрої, в яких сенсор і ланцюг первинної обробки співіснують, і зв'язок один з одним і з високорівневими обробними шарами більше, ніж просто поняття перетворення. Все в інтелектуальному датчику розробляється для специфічного використання.

«Інтелектуальні» датчики полегшують проектування мікросенсорних систем датчиків, роблять його більш простим, дешевим і швидким, а результуючі системи більш безпечними і більш масштабованими.

До таких «інтелектуальних» датчиків відносяться і мікромеханічні пристрої (MEMS) СОН.

На Рис.1.1 зображено схему деяких функцій інтелектуалізації датчиків СОН.

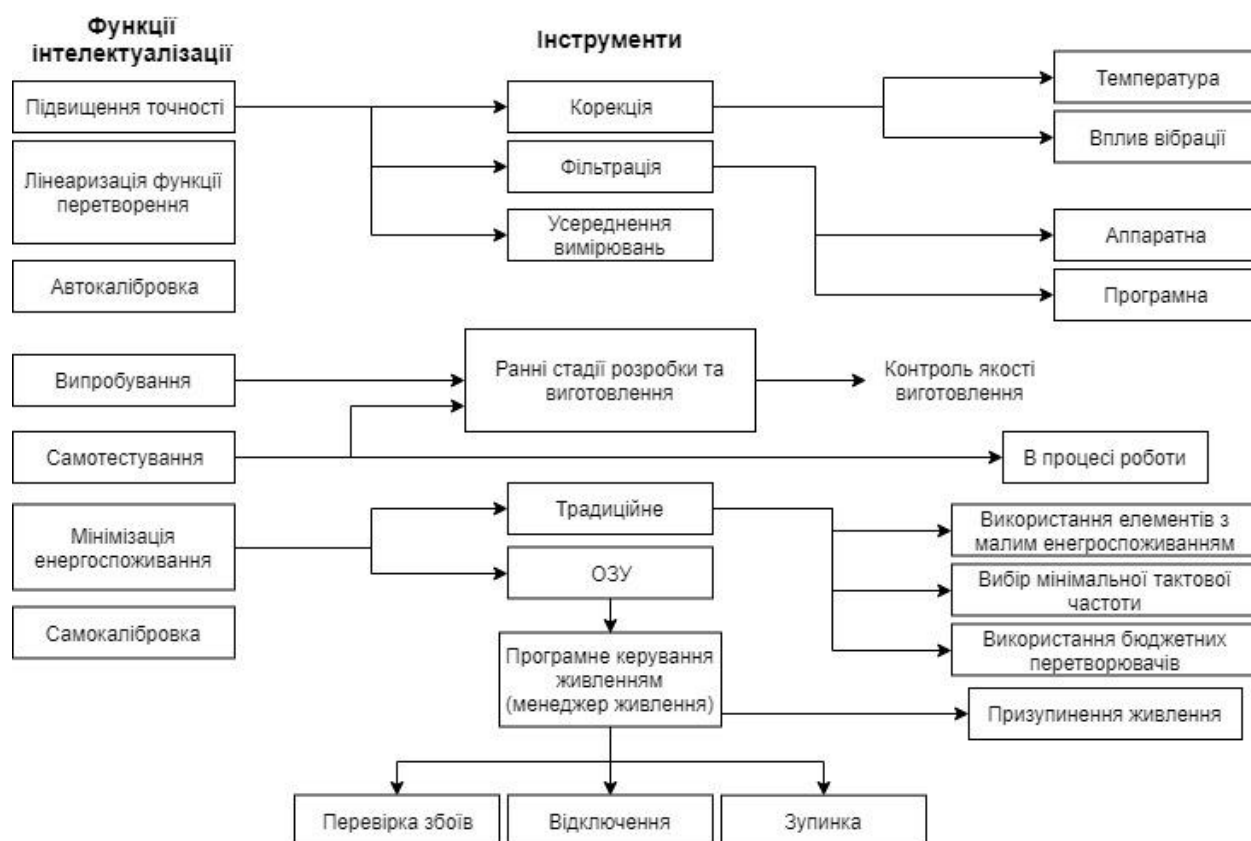


Рис. 1.1. Функції інтелектуалізації датчиків СОН

### 1.3. НАДЛИШКОВІСТЬ ЯК ЗАСІБ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ПРИЛАДІВ СОН.

#### ТЕОРІЯ НАДЛИШКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

Теорія надлишкових вимірювань (ТНВ) — це система принципів, методів, положень і умов, що характеризує нову стратегію вимірювань при, в загальному випадку, нелінійному та нестабільному функціонуванні перетворювача, сенсора і / або вимірювальних перетворювачів (ВП), що формує нові шляхи вимірювального перетворення величин різної фізичної природи і передбачає досяжні результати по

точності, швидкодії і системної метрологічної надійності надлишкових вимірювачів (НВ).

Головним завданням теорії надлишкових вимірювань є забезпечення похибки результату вимірів сумірною з похибкою відтворення фізичних величин (ФВ) використовуваної зразкової міри.

### **Переваги надлишкових вимірювань (НВ)**

1. Якщо цільовою функцією прямих вимірювань є отримання достовірних результатів, то цільовою функцією НВ є не тільки отримання достовірних результатів, а й автоматична корекція похибок при нелінійної та нестабільної функції перетворення (ФП) сенсора або вимірювального каналу (ВК) в цілому.

2. Надлишкові вимірювання спрямовані на досягнення головної мети метрології — отримання результату вимірювань з похибкою, яка відповідає похибці зразка.

3. НВ забезпечують високоточне лінійне і нелінійне вимірювальне перетворення фізичної величини.

4. При лінійному вимірювальному перетворенні фізичної величини і нелінійної функції перетворення (НФП) сенсора або вимірювального каналу (ВК) в цілому отримують результат вимірювань, який з високою точністю лінійно залежить від коригуючих фізичних величин.

5. При нелінійному вимірювальному перетворенні ФВ і нелінійної функції перетворення (НФП) сенсора в цілому отримують результат вимірювань, який із заданою точністю нелінійно залежить від контрольованої фізичної величини (КнФВ).

6. НВ вирішують задачу лінеаризації і деформації не НФП, а лінеаризацію і деформацію загальної (віртуальної) функції перетворення (ЗФП).

7. НВ притаманні дві гілки системної лінеаризації ЗФП, пов'язані з алгоритмічними і функціонально-алгоритмічними методами перетворення. Прямі вимірювання не вирішують завдання лінеаризації рівняння вимірювання при НФП ВК.

8. При НВ результат вимірювань ФВ отримують наведеним до входу ВК, - як в методах врівноваження. У всіх інших методах прямих вимірювань результат вимірювань отримують наведеним до виходу ВК. Це є основною причиною отримання неточного результату вимірювань. Справа в тому, нестабільність і нелінійність ФП сенсора та інших вимірювальних перетворювачів (ВП) призводить до появи більшості складових похибки сприйняття і перетворення ФВ. Вихідний сигнал сенсора далі трансформується до виходу ВК. Проходячи через інші ВП з нестабільними і нелінійними ФП сигнал посилюється, неточно перетворюється, піддається впливу шумів, перешкод, нелінійних спотворень. Отриманий на виході ВК постійний сигнал (або код числа) характеризує КтФВ з похибкою, значення якої знаходяться в деякій смузі невизначеності. При прямих вимірюваннях необхідно докласти чимало зусиль, щоб зменшити довірчі межі смуги невизначеності результату вимірювань до значень, які забезпечують привласнення того чи іншого класу точності даного ЗВ. На сьогодні багато методів прямих вимірювань вичерпали свої можливості по досяжній точності [7].

*Інформаційно-надлишковий датчик* — це датчик, що дозволяє сформувати опорне значення на основі додаткового параметра вихідного сигналу або за допомогою вбудованого в датчик засобу, і виконати метрологічний самоконтроль при підключенні до пристрою обробки сигналів.

### **Приклади:**

1. *Інформаційно-надлишковий датчик температури, що містить кілька термопар, близьких по точності.*

Зазвичай в такому датчику критичної складової похибки є сукупність випадкової похибки і систематичної, не пов'язаної з синхронним дрейфом характеристик первинних вимірювальних перетворювачів. У цьому випадку в якості опорного значення може бути використано середнє відхилення вихідних сигналів термопар від їх середнього значення, визначене на етапі попередньої калібрування.

Метрологічний діагностичний контроль здійснюється по зміні середнього відхилення вихідних сигналів термопар від опорного значення, якщо інформаційно-надлишковий датчик підключений до пристрою обробки сигналів.

## 2. *Інформаційно-надлишковий кульковий датчик витрат.*

Зазвичай в такому датчику критична складова похибки пов'язана з зносом підшипника. В даному випадку в якості прийнятих опорних значень можуть бути використані короточасні відхилення періоду і амплітуди сигналу витратоміра від їх середніх значень, визначених на етапі попереднього калібрування.

При підключенні пристрою обробки даних до датчика метрологічний самоконтроль здійснюється по зміні короточасних відхилень періоду і амплітуди сигналу витратоміра від їх прийнятих опорних значень відповідно.

## 3. *Алгоритмічні або схемотехнічні методи підвищення вібро- і ударостійкості мікромеханічних гіроскопів*

Клас алгоритмічних методів підвищення стійкості заснований на використанні додаткових процедур перетворення сигналу в ЧЕ. Одним із методів підвищення стійкості ММГ до прискорення є модифікації його електронної системи управління (СУ).

При використанні декількох ЧЕ в складі модуля ММГ для підвищення вібростійкості запропоновано використовувати метод мажоритарного вибору в якості алгоритму перетворення вихідного сигналу. За рахунок надлишкового числа однотипних ЧЕ, що володіють різною реакцією на вібраційний вплив, вибирається сигнал того ММГ, у якого відсутній на виході помилковий сигнал високих рівнів внаслідок субгармонічних резонансів. Для того щоб помилкові сигнали при дії вібрацій на одній частоті не виникали одночасно на виході двох ММГ, власні частоти (інерційного тіла) ІТ на УП повинні відрізнятися не менш, ніж на 10%.

Для визначення реакції ММГ на вхідний інерційний вплив з метою подальшої компенсації (коригування вихідного сигналу) ММГ може бути доповнений акселерометром або датчиком переміщень ІТ. У розширення можливостей згаданих методів можуть бути використані результати калібрування ЧЕ ММГ для визначення чутливості ММГ до постійних прискорень і до вібрації. Знання коефіцієнтів

чутливості до прискорення при подальшій компенсації дозволить підвищити експлуатаційні характеристики ММГ при відповідній обробці вихідного сигналу. Застосування таких методів для усунення помилки від високочастотної вібрації пов'язано з труднощами створення складної системи, що забезпечує необхідні фазові співвідношення між сигналом перешкоди і сигналом акселерометра. Згідно з оцінками подібні методи найбільш ефективні при компенсації впливу постійних або низькочастотних прискорень [10].

#### *4. Диференціальний ємнісний датчик переміщень з додатковою інформацією про проміжок*

Диференціальні ємнісні датчики переміщень призначені для перетворення однієї фізичної величини, ємності, в іншу, наприклад, в напругу. Вони є вхідною частиною різних мікромеханічних пристроїв: гіроскопів, акселерометрів, датчиків тиску, різних сенсорів, ємнісних мікрофонів, тобто пристроїв, в яких використовується ємнісний метод знімання інформації.

Розглянемо мікромеханічних гіроскоп (ММГ) – пристрої, побудовані за технологією мікроелектронної промисловості, які вимірюють кутову швидкість основи відносно інерційного простору. Вони починають все більше і більше застосовуватись у техніці, де використання традиційних гіроскопів через їх масу, габарити та ціну стає неможливим.

Робота ММГ полягає у визначенні сили інерції Коріоліса, функціонально зв'язаної з параметром кутової швидкості об'єкта, для чого необхідно привести інерційну масу (ІМ) в рух з лінійною швидкістю, вектор якої складає з кутовою швидкістю деякий кут [39].

Конструкція ММГ найбільш чутлива до таких механічних впливів, як лінійні вібрації, удари і прискорення вздовж осі первинних коливань, і до зміни температури. Перераховані зовнішні впливи призводять до зміни зазору між вимірювальними електродами, розташованими по осі первинних коливань, і ІМ. При цьому змінюються характеристики датчиків кута і датчиків моменту, зокрема, їх коефіцієнти передачі. Це призводить до зміни масштабного коефіцієнта і зміщення



нуля, а також впливає на величину негативної жорсткості і квадратурну похибку, що, в свою чергу, призводить до появи похибок виміру в вихідному сигналі ММГ.

Відомі різні способи зменшення впливу змін міжелектродного зазору. У джерелі [12], запропоновано рішення для гіроскопів прямого типу перетворення, що полягає у вимірюванні суми струмів, протікаючих крізь електроди диференціального ємнісного датчика для виділення інформації про проміжок (зазор) і у використанні отриманого сигналу для підтримки постійної амплітуди коливань по первинній осі. Однак такої схеми компенсації зміни зазору в ММГ замкнутого типу недостатньо, так як від величини зазору залежать моменти, прикладені до силових електродів по осі вторинних коливань, отже, і коефіцієнти передачі цих електродів. Мета цієї роботи полягає в розробці структури диференціального ємнісного датчика переміщень, особливістю якого є наявність додаткового вихідного сигналу, пропорційного проміжку між вимірювальними електродами і ІТ і аналізі можливості використання цього додаткового сигналу для підвищення точності мікромеханічних датчиків [11].

Отже, теорія прямих вимірювань практично вичерпала всі свої можливості, оскільки була призначена для вирішення вимірювальних завдань тільки за лінійною функцією перетворення сенсора або вимірювального каналу в цілому. У більшості випадків рішення вимірювальних завдань методом прямих вимірювань стає економічно невигідним, оскільки замовником встановлюються все більш високі вимоги з якості сенсорів і вимірювальних каналів.

Теорія надлишкових вимірювань розвиває нову стратегію вимірювань, яка, як було показано вище, в корені відрізняється від стратегії прямих вимірювань. Завдяки високій досяжної точності, чутливості та метрологічній надійності теорія надлишкових вимірювань займає провідне місце в метрології та вимірювальній техніці. На основі її методів розробляються сучасні технічні рішення засобів надлишкових вимірювань.

Теорія надлишкових вимірювань поступово розсовує існуючі рамки науки метрології, доповнюючи і збагачуючи загальну теорію вимірювань новими науковими міні-теоріями, теоретичними принципами, положеннями, твердженнями і



установками, а вимірювальну техніку - новими підходами, методологією, принципами створення та побудови високоточних засобів вимірювальної техніки і інформативно-надлишкових сенсорів [7].

#### **1.4. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ПО ВИКОРИСТАННЮ ІНФОРМАЦІЙНО-НАДЛИШКОВИХ ДАТЧИКІВ**

Проблема достовірності використовуваної в системах орієнтації і навігації вимірювальної інформації щорічно загострюється в зв'язку з ростом кількості керованих об'єктів і витрат на їх обслуговування. Значна частка порушень в роботі цих приладів пов'язана з використанням результатів вимірювань, похибка яких перевищує допустимі межі.

Традиційні методи вимірювань не дозволяють мінімізувати ризик помилкових рішень. На основі аналогії між засобом вимірювань і системою зв'язку в роботі [15] показано можливість використання досягнень теорії зв'язку для підвищення точності вимірювань. У системах зв'язку надлишковість переданої інформації дозволяє послабити вплив перешкод, а в датчиках і їх системах, що входять до складу приладів СОН, надлишкова вимірювальна інформація може дозволити організувати автоматичну корекцію похибки. Відомий підхід тут - використання надмірності, яка штучно вводиться або є в переданому сигналі, для підвищення достовірності інформації при впливі перешкод.

Введення надлишкових компонентів і зв'язків, без яких неможливо збагатити вимірювальну інформацію, здавалося б, повинно знизити надійність систем вимірювань. Але ефективність саме такого підходу доводить аналогія розвитку вимірювальної техніки і біологічних сенсорних систем [16].

Удосконалення біологічних "систем управління" в ході еволюції супроводжувалося зростанням числа різних компонентів, їх утворюють, ускладненням структурних зв'язків між цими компонентами. Потреба оцінювати стан організму і прогнозувати майбутні зміни для вирішення завдання збереження життя привела до народження інтелекту, а в нашому випадку - до використання інтелектуальних датчиків і систем.

Відповідно, еволюція систем вимірювань повинна супроводжуватися ускладненням їх структури, введенням елементів штучного інтелекту. В сукупності, все це повинно багаторазово продовжити "цикл життя" систем вимірювань без їх частого обслуговування.

Цей метод вимірювань спирається на досягнення теорій перешкодостійкого зв'язку, інваріантності і структурних методів підвищення точності, в яких надлишковість використовується для ослаблення впливу певних чинників на передану інформацію або результат вимірювання. Введення надлишковості має на меті виділення похибки, обумовленої такого роду впливами, і подальшої її компенсації.

Підвищення точності систем вимірювання параметрів орієнтації та навігації також може бути організовано на основі цього методу вимірювань. Види надлишковості зображено на схемі Рис. 1.2:



Рис. 1.2. Види надлишковості

*Структурна надлишковість* означає використання додаткових заходів або перетворювачів порівняно з мінімально необхідним їх числом.

Одним із прикладів введення структурної надлишковості є мажоритарна схема включення чутливих елементів: три акселерометра і три датчика кутової швидкості по кожній осі системи координат, пов'язаної з малим космічним апаратом [17]. Зазначена схема забезпечує повну діагностику за глибиною до місця відмови при забезпеченні виконання наступних умов:

- кількість вимірювачів забезпечує виконання критерію структурної діагностики вимірювального блоку;
- для вирішення завдань діагностування та відновлення з метою мінімізації похибок вимірювання необхідно використовувати інформацію, отриману в

вимірювальному блоці від однотипних датчиків, що мають однакові характеристики по точності, без залучення зовнішніх вимірювань;

- надлишковість не повинна впливати на основні функціональні завдання, які вирішуються вимірювальною системою.

*Часова надлишковість* передбачає проводити додаткові операції вимірювань, що проводяться з інтервалом часу, меншим мінімально необхідним, або в смузі частот більше максимально необхідної. Один з можливих варіантів використання методу тимчасової надлишковості з метою усунення вібраційної похибки мікромеханічного акселерометра описаний в роботі [18]. Суть методу полягає в тому, що для збільшення площі датчика переміщень і датчика сили здійснюється почергове використання в часі цих пристроїв з сумарною площиною електродів.

*Функціональна надлишковість* – заснована на використанні додаткової залежності між вимірюваною величиною і вихідним сигналом.

В роботі [19] представленої структури диференціального ємнісного датчика переміщень з додатковою інформацією про проміжок, особливістю якого є наявність додаткового вихідного сигналу, пропорційного зазору між вимірювальними електродами і ІТ, і аналізів можливості використання цього додаткового сигналу для підвищення точності мікромеханічних датчиків. Для оцінки впливу зовнішніх впливів на різні параметри ММГ в якості об'єкта дослідження було обрано гіроскоп RR-типу розробки ЦНДІ «Електроприлад». Конструктивна схема і принцип дії пояснюються Рис. 1.3

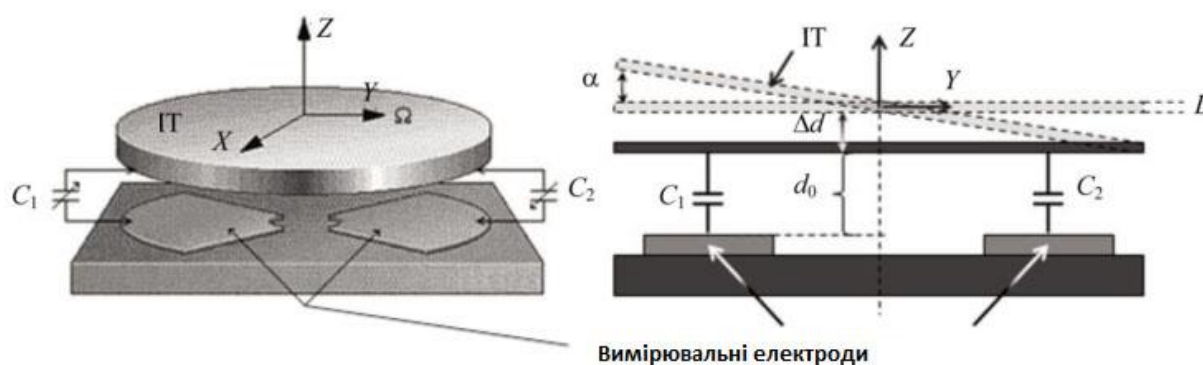


Рис. 1.3. Конструктивна схема ММГ

Інерційне тіло (ІТ) на пружному підвісі під управлінням системи розгону здійснює коливальні рухи навколо осі первинних коливань  $Z$ . При появі кутової швидкості основи  $\Omega$  по осі чутливості  $Y$  виникають моменти сил Коріоліса, що викликають вторинні кутові коливання ІТ навколо осі  $X$ . При відхиленні ротора на кут  $\alpha$ , пропорційний діючій кутової швидкості, будуть змінюватися відстані між вимірювальними електродами і ІТ. Вплив таких зовнішніх факторів, як температури, вібрації, лінійного прискорення і тиску, буде приводити до зміни початкового зазору  $d_0$  на величину  $\Delta d$ .

Іншими словами, при зміні величини зазору один і той же нахил ротора буде викликати різні зміни ємностей, що призведе до зміни масштабного коефіцієнта датчиків кута і моменту. Для цього необхідно компенсувати цю зміну, щоб масштабний коефіцієнт датчиків залишався постійним.

Для електродів, що мають форму обмеженого сектора (рис. 1.4), ємності  $C_1$  і  $C_2$  можуть бути визначені за формулами:

$$C_1(\alpha, \Delta d) = \varepsilon_0 \cos(\alpha) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\Psi_{\min}}^{\Psi_{\max}} \frac{r}{(d + \Delta d) + r \cos(\Theta) \sin(\alpha)} d\Theta dr, \quad (1.1)$$

$$C_2(\alpha, \Delta d) = \varepsilon_0 \cos(\alpha) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\Psi_{\min}}^{\Psi_{\max}} \frac{r}{(d_0 + \Delta d) - r \cos(\Theta) \sin(\alpha)} d\Theta dr \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} [\text{Ф/м}]$  - електрична постійна;  $\alpha$ - кут повороту ІТ навколо вторинної осі, [рад];

$d_0$  - зазор між ІТ і вимірювальними електродами в нейтральному положенні, [м];  
 $R_{\max}$  і  $R_{\min}$  - відповідно внутрішній і зовнішній радіуси розглянутого електрода, [м];  
 $\Psi$ - кут сектора електрода, [град].

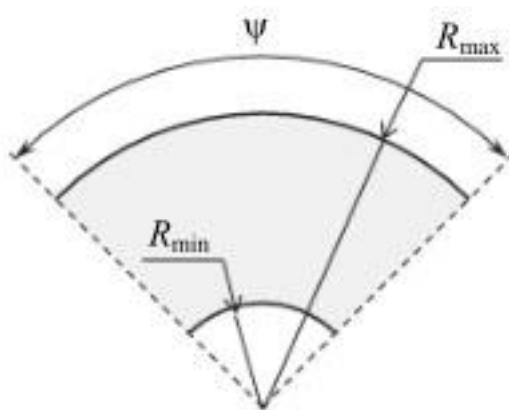


Рис. 1.4. Форма вимірювальних електродів

Для того щоб оцінити вплив лінійних прискорень на зміну зазору, можна скористатися другим законом Ньютона і законом Гука:

$$(K_{\text{мех}0z} - K_{\text{ел}})\Delta d = ma_{0z} \quad (1.3)$$

де  $m$  маса ІТ, [кг];

$a_{0z}$  - прискорення, яке діє вздовж осі  $Z$ , [ $\text{m/s}^2$ ];

$K_{\text{мех}0z}$  - лінійна механічна жорсткість уздовж осі  $Z$ , [Н / м];

$K_{\text{ел}}$  - електростатична жорсткість, [Н / м].

У табл. 1.1 наведена залежність зміни зазору від діючого прискорення. Наприклад, для зазору  $d_0 = 2$  мкм при впливі прискорення, рівного 300 g, зазор зміниться на 0,6 мкм, що призведе до зміни масштабного коефіцієнта датчика кута і масштабного коефіцієнта гіроскопа на 30%.

Таблиця 1.1 Залежність зміни зазору від діючого прискорення

Лінійне прискорення вздовж осі $Z$ , [ $\text{m/s}^2$ ]	Зміна зазору, мкм
10g	0,023
50g	0,115
300g	0,69

На величину зазору впливає і температура, так як її зміна приводить до зміни розмірів ІТ. Використовуючи коефіцієнт розширення кремнію  $\alpha_L = 2,33 \times 10^{-6} 1/^\circ \text{C}$  і

товщину ІТ  $L = 60 \text{ мкм}$ , можна визначити лінійне розширення матеріалу при зміні температури  $\Delta T$  (табл. 1.2).

*Таблиця 1.2. Залежність розширення ІТ при зміні температури*

Зміна температури, °C	Розширення ІТ
5	0.7
20	2.8
30	4.2

У мікромеханічних датчиках прямого перетворення для вирішення задачі компенсації пропонується алгоритмічний підхід. Для цього необхідно вимірювати не тільки диференціальне зміна ємності, але і синфазне. При цьому пропонується змінити існуючу структурну схему перетворювача, яка показана на рис. 1.3. На вимірювальні ємності  $C_1$  і  $C_2$ , які представляють собою ємнісний міст, з генератора сигналу (ГС) подається напруга, що змінюється за гармонійним законом.

При цьому через ємності будуть протікати струми  $I_1$  та  $I_2$ , які складаються з двох компонент:

$$I_1 = I(C_0) + I(\Delta C) \quad (1.4)$$

$$I_2 = I(C_0) - I(\Delta C) \quad (1.5)$$

де  $I(C_0)$  – струм, пропорційний величині зазору;

$I(\Delta C)$  – струм, який визначається корисною зміною ємності.

Ці струми за допомогою трансрезистивних підсилювачів  $K_1$  і  $K_2$  перетворюються в напруги  $U_1$  та  $U_2$  відповідно, які також складаються з двох компонентів  $U(C_0)$  та  $U(\Delta C)$ .

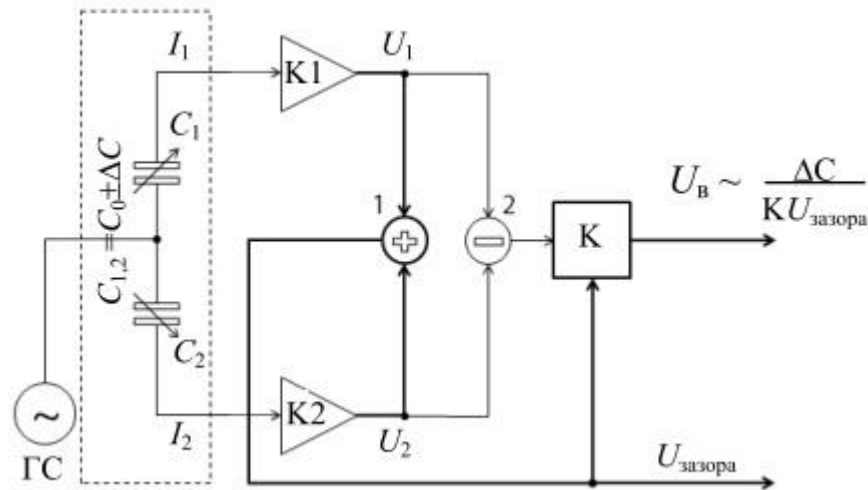


Рис. 1.5. Структурна схема диференціального ємнісного датчика

Після розрахунку напруга в точці 2 дорівнюватиме:

$$U_1 - U_2 = (U(C_0) + U(\Delta C)) - U(\Delta C) = 2U(\Delta C) \quad (1.6)$$

Але, так як при зміні зазору змінюється коефіцієнт перетворення датчика кута, то різниця напруги буде залежати і від величини зазору, яку можна визначити, якщо скласти напруги  $U_1$  та  $U_2$  в точці 1:

$$U_1 + U_2 = 2U(C_0) \quad (1.7)$$

Отримана напруга залежить тільки від компоненти, пропорційній величині зазору. Вихідний сигнал диференціального ємнісного датчика визначається відношенням сигналу в точці 2 до сигналу на виході суматора 1 (блок компенсації К). При цьому отриманий вихідний сигнал не залежить від проміжку.

У випадку, коли мікромеханічні датчики працюють за принципом компенсації вхідного впливу, необхідно вживати додаткових заходів, так як при зміні зазору змінюються коефіцієнти передачі силових електродів.

На рис. 1.6. приведена структурна схема датчика із зворотним зв'язком, що включає: чутливий елемент (ЧЕ), датчик переміщень з додатковим виходом про зміну проміжку, регулятор і силові електроди, на яких створюється момент управління  $M_{уп}$ .

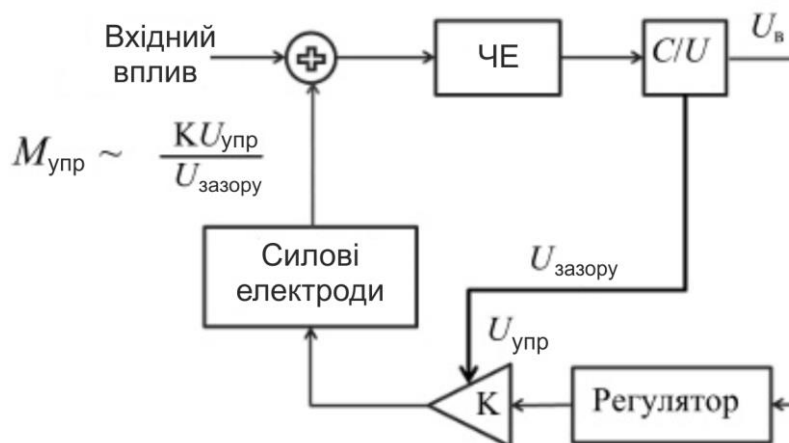


Рис. 1.6. Використання сигналу в датчиках компенсаційного типу

Зміна коефіцієнтів передачі силових електродів, при постійній вхідній дії призводить до зміни сигналу управління  $U_{\text{упр}}$  (який є інформаційним) і появи похибки вимірювання.

За допомогою додаткового сигналу, пропорційного зміні проміжку, і блоку компенсації  $K$ , в зворотному зв'язку датчика підтримується постійний коефіцієнт передачі силових електродів. В цьому випадку масштабний коефіцієнт датчика не залежить від зазору.

В дисертаційній роботі пропонується для підвищення стійкості мікромеханічного гіроскопу RR-типу ввести в його структуру додаткові датчики для виміру віброприскорення (акселерометри), і за допомогою алгоритму обробки надлишкової інформації по створеній математичній моделі вібраційної похибки компенсувати її в реальному часі.

## 1.5. МІКРОМЕХАНІЧНІ ГІРОСКОПИ

Мікромеханічні гіроскопи (ММГ) знайшли широке використання у широкому розмаїтті приладів військової і цивільної техніки [21-23]. Підвищення вимог до технічних характеристик ММГ пояснюється постійним зростанням кількості областей застосування цих приладів і інерційних модулів, в яких ММГ служать датчиками кутових швидкостей. Однією з основних проблем при розробці такого



типу гіроскопів є забезпечення їх механічної стійкості в екстремальних умовах експлуатації [4-7].

При виробництві ММГ використовують технології сучасної твердотільної мікроелектроніки, а також використовують матеріали, що дозволяють забезпечити малі габарити, вагу і енергоспоживання, високу надійність і стійкість до зовнішніх впливів, низьку вартість мікромеханічних датчиків. Сумісність механічної частини датчика з сервісною електронікою дозволяють створювати в єдиних технологічних процесах інтегральні модулі (чіпи) - гіроскопи і акселерометри, а також збірки інерційних елементів об'ємом 0,5-10 см<sup>3</sup> з споживною потужністю 0,5-1 Вт. При виготовленні інерційної маси ММГ товщиною в декілька мікрометрів в переважній більшості використовують монокристалічний кремній [28].

В пружних підвісах ММГ в основному використовуються два типи механічних структур, їм відповідають два типи технологічних процесів обробки кремнію – об'ємна (bulk-micromachined) і поверхнева (surface-micromachined). При використанні об'ємної обробки відбувається видалення матеріалу шляхом хімічного витравлювання відповідно до кристалографічної структури матеріалу. У цьому випадку можливе виготовлення структур з товщиною до декількох сотень мікрометрів.

У разі поверхневої обробки на планарній поверхні кремнієвої пластини з використанням дифузії, фотолітографії і анізотропного травлення формується рельєф осцилятора. Після операції анодного зрощування зі скляною підкладкою проводиться видалення «жертвовного» шару кремнію до розтину рельєфу осцилятора. Товщина отриманих пластин осциляторів обмежена величинами порядку 10-20 мкм.

### **1.5.1. Види мікромеханічних гіроскопів**

Відома велика кількість різноманітних схем ММГ. Загальною конструктивною ознакою ММГ - вібраційних датчиків кутової швидкості, є використання в них різних за конфігурацією двоступеневих пружних підвісів чутливого елемента (ЧЕ). Принцип роботи ММГ полягає в створенні відносно корпусу знакозмінного

поступального або обертового руху ЧЕ по одній із ступенів свободи і вимірі переміщень по іншій ступені свободи, що виникають під дією коріолісових сил або гіроскопічних моментів при наявності переносної кутової швидкості корпусу. На Рис. 1.7 цей принцип пояснюється на прикладі ММГ з двоступеневим пружним підвісом і поступальними переміщеннями ЧЕ. При наявності знакозмінної відносної лінійної швидкості  $V$  вздовж осі  $OX$  і переносний вимірюваної кутової швидкості  $\Omega$  навколо осі  $OZ$  з'являються знакозмінні прискорення Коріоліса  $W_K$  і відповідна йому сила  $F_K$  уздовж осі  $OY$ .

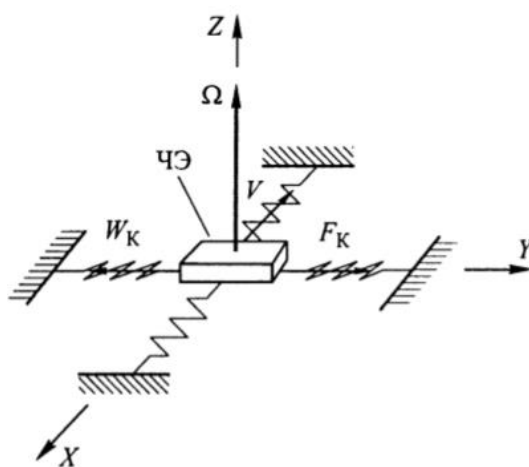


Рисунок 1.7. Принцип роботи мікромеханічного гіроскопа

Амплітуда переміщення  $y$  за однакової кількості власних частот по обох ступенях свободи для випадку резонансу визначиться наступним співвідношенням:

$$y = \frac{F_K}{c} Q \Omega = \frac{2mV}{c} Q \Omega, \quad (1.8)$$

де  $C$  – жорсткість пружного підвісу;

$m$  – маса ЧЕ;

$Q$  – добротність підвісу;

$\Omega$  – кутова швидкість.

По принципу побудови пружного підвісу усі відомі типи ММГ можна класифікувати у відповідності до рис. 1.8:

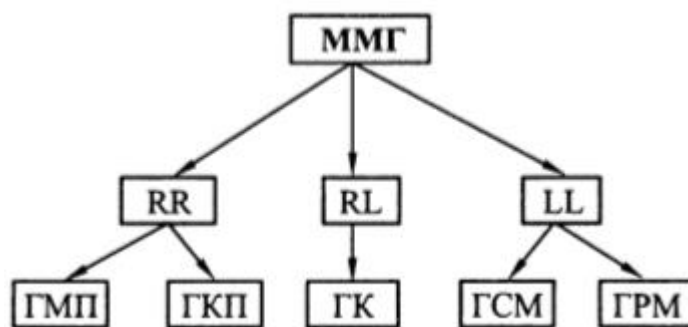


Рис. 1.8. Класифікація ММГ за принципом побудови пружного підвісу.

ММГ можна розділити на три групи в залежності від типу руху ЧЕ в підвісі: ММГ RR-типу (Rotate - Rotate) – з обертотим рухом ЧЕ по обидва ступені свободи; ММГ RL-типу (Rotate - Linear) – з обертотим рухом по одній ступені свободи і з поступальним - по іншій; ММГ LL-типу (Linear - Linear) – з поступальним рухом по обидва ступені свободи. У кожній з виділених груп кількість можливих варіантів схем мікромеханічного гіроскопу може бути дуже велика. На схемі в кожній з груп вказані найбільш відомі і в тій чи іншій мірі реалізовані варіанти ММГ:

- ГМП – гіроскоп з маятникових підвісом;
- ДКП – гіроскоп з карданним підвісом;
- ГК – гіроскоп камертонний;
- ГЗМ – гіроскоп із зосередженою масою;
- ГРМ – гіроскоп з розподіленою масою.

Розглянемо коротко принципи побудови та типові конструктивні схеми ММГ.

*ММГ RL-типу (гіроскоп камертонний, ГК).*

Конструкція ММГ камертонного типу представлена на рис. 1.9. У цьому гіроскопі вимушений рух ЧЕ, що забезпечується вібраційним двигуном, є поступальним; інший рух, що є інформаційним – є обертальний. Конструкція виконана з монокристалічного кремнію і являє собою камертон, реалізований у вигляді двох інерційних мас 1, закріплених за допомогою пружних елементів 2 у зовнішній рамці 3. Рамка пов'язана з основою через пружні елементи 4, що забезпечують їй обертальний рух навколо осі 2. [29]

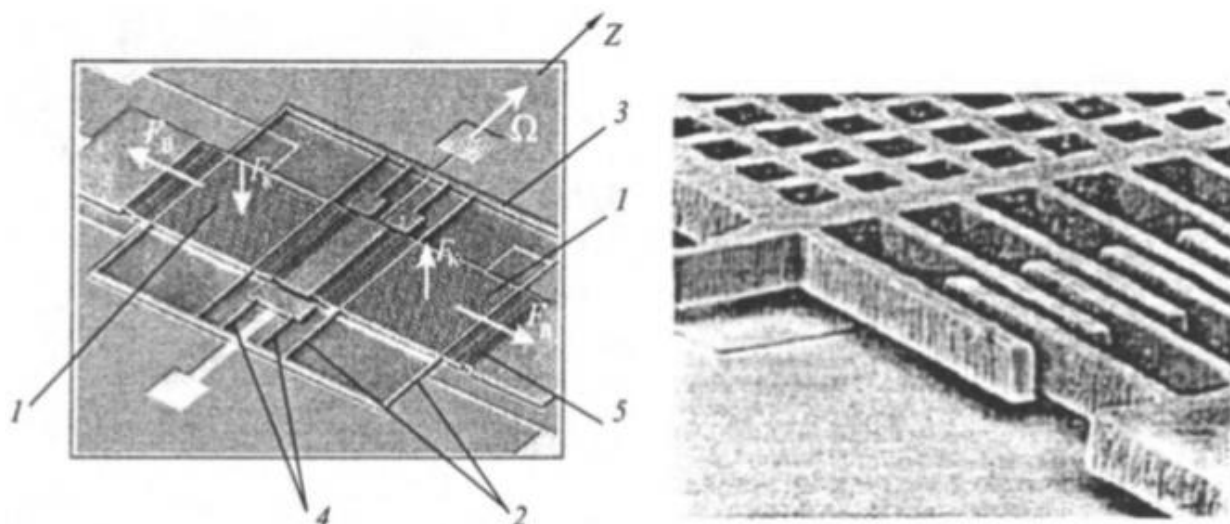


Рис. 1.9. Конструкція ММГ RL-типу.

За допомогою електростатичного вібраційного двигуна, виконаного у вигляді «гребінчастої» структури Рис. 1.9 збуджуються протифазні поступальні коливання маси. При наявності кутової швидкості основи  $\Omega$ , вектор якої збігається з вимірювальною віссю 2 обертання рамки, виникають сили Коріоліса, які створюють змінний момент, це призводить до кутових коливань рамки навколо осі 2 з частотою рівній частоті двигуна. Амплітуда коливань рамки є мірою вимірюваної кутової швидкості. Вимірювання коливань рамки здійснюється за допомогою ємнісного датчика, електроди якого розташовані на підкладці під інерційними масами. Номінальна величина ємностей між електродами і інерційною масою  $\sim 1$  пФ. Характерний розмір інерційної маси складає  $\sim 1$  мм. Товщина підвісу з метою збільшення жорсткості його конструкції і збільшення чутливості ММГ доведена до 400 мкм. Одна з основних похибок ММГ – квадратурна, викликана вібраційним двигуном внаслідок неперпендикулярності осі збурення і вимірювальної осі.

#### *ММГ LL-типу (гіроскопи з зосередженої масою, ГЗМ).*

В основу конструктивної схеми ММГ покладено виконаний з полікристалічного кремнію пружний підвіс ЧЕ з двома поступальними ступенями свободи в площині підвісу. У конструкції гіроскопу використовуються два незалежних пружних підвісу двох ЧЕ на одній підкладці, збуджуваних за допомогою гребінчастого електростатичного вібраційного двигуна і об'єднаних

диференціальної системою ємнісного знімання, утвореної кожним з ЧЕ його системою гребінчастих електродів ємнісного датчика і системою електродів, розташованих на підкладці. Така конструкція ММГ забезпечує зниження похибки гіроскопа від лінійних прискорень, а також від ударів і лінійних вібрацій основи. Товщина механічної структури підвісу складає 6 мкм. Корпус ММГ не вакуумують, тому, незважаючи на невисоку твердість підвісу через його малої товщини і відносно великій площі, стійкість до впливу ударів і вібрацій в напрямку, перпендикулярному площині підкладки, забезпечується повітряною подушкою, що виникає в проміжку між підкладкою і поверхнею ЧЕ. Прилад розміщується в керамічному корпусі розміром 7 x 7 x 3 мм і має масу менше 1 г.

Перевагою цього ММГ є його висока захищеність від лінійних перевантажень, вібрацій і ударів, що забезпечується повітряним демпфуванням в підвісі і диференціальними структурами підвісу і системи знімання. Іншою важливою перевагою є розташування сервісної електроніки в інтегральному виконанні на одній підкладці з механічною структурою в одному чіпі, що істотно знижує рівень шумових сигналів в системі знімання. В якості переваги ММГ слід також відзначити відсутність необхідності в забезпеченні вакууму в корпусі гіроскопа. Величина випадкового дрейфу становить  $\sim 0,3$  град/с.

*ММГ LL-типу (гіроскоп з кільцевим резонатором, ГКР).*

У цьому гіроскопі в ЧЕ використовується кільцевий резонатор. Перевагою подібних ММГ є їх стійкість до зовнішніх механічних впливів, що забезпечується симетрією конструкції КР і його підвісу. Конструкція забезпечує мінімізацію впливу паразитних ступенів свободи, а також температурну стабільність власної частоти резонатора і його добротності. У відомих ММГ з кільцевим резонатором, як правило, реалізується схема компенсаційного типу. Випадковий дрейф гіроскопа при цьому становить 0,2 град/с.

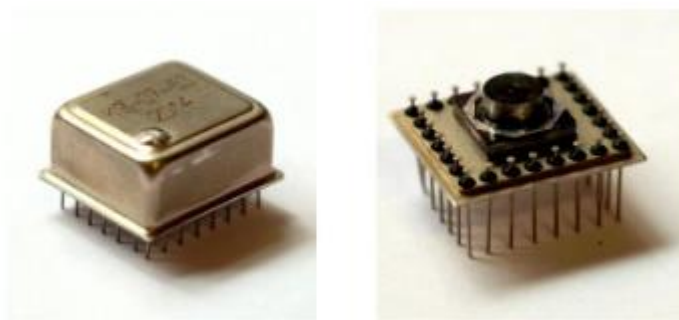


Рис. 1.10. Зовнішній вигляд ММГ з кільцевим резонатором

В іншому варіанті конструкції ММГ з КР фірми BAE Systems застосовується електростатична система збудження і ємнісна система знімання сигналу. Такий варіант конструкції істотно спрощує виготовлення і збірку ММГ, забезпечує можливість балансування параметрів КР за допомогою електростатичного приводу, зменшує габарити і масу, дозволяє позбутися від проблем, пов'язаних з нестабільністю його магнітних компонентів, підвищити його стійкість по відношенню до зовнішніх механічних і температурних впливів і знизити вартість ММГ [20].

#### *ММГ RR-типу (гіроскоп з карданним підвісом, ГКП)*

Кардановий мікромеханічний гіроскоп, розроблений в 80-х роках фахівцями Дрейперівської Лабораторії, став прототипом для подальших розробок, які почалися в Україні [30, 31] і Росії [32]. Розробка карданового мікромеханічного гіроскопа в Україні велася вченими Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського" спільно з технологами Київського науково-дослідного інституту "Оріон". В результаті був виготовлений експериментальний зразок карданового мікромеханічного вібраційного гіроскопа [33].

У конструкціях ММГ ГКП реалізований пружний карданний підвіс ЧЕ. У першому варіанті ММГ використовується зовнішній пружний двухрамочний карданний підвіс інерційної маси, розташованої симетрично відносно площини механічної структури. Навколо осі внутрішньої рамки за допомогою електростатичного вібраційного двигуна, (реалізований у вигляді пари електродів,

розташованих на діелектричній підкладці під внутрішньою рамкою) створюється змінний кінетичний момент. При появі вимірюваної кутової швидкості, перпендикулярної площині механічної структури підвісу, виникає змінний гіроскопічний момент, що призводить до коливань зовнішньої рамки. Амплітуда цих коливань пропорційна вимірюваній кутовій швидкості. Знімання коливань здійснюється за допомогою ємнісного датчика, пара електродів якого розташована під зовнішньою рамкою Рис.1.11.

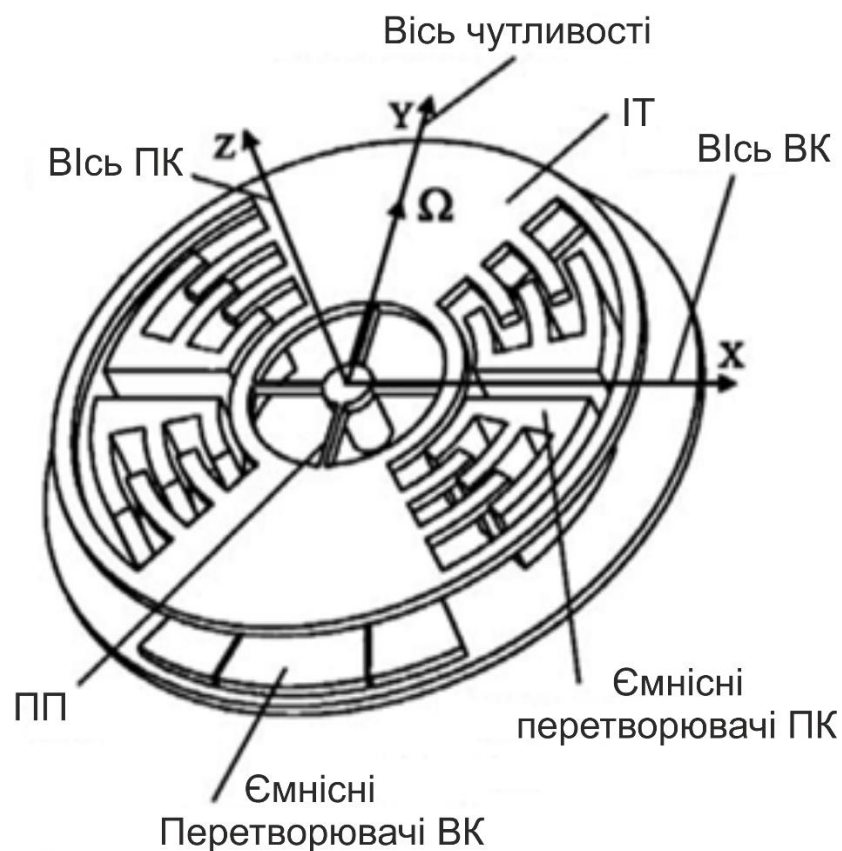


Рис. 1.11. Схема ММГ RR-типу

Ідеальний ММГ RR-типу повинен бути нечутливий до поступальної вібрації внаслідок кутових первинних і вторинних коливань. Однак інструментальні похибки, наявність нелінійності і кінцева жорсткість пружного підвісу в напрямку осей X, Y і Z призводять до прояву впливу поступальної вібрації на вихідний сигнал датчика [34].



### **Висновки до розділу**

1. У першому розділі магістерської дисертації було проаналізовані основні проблеми та завдання сучасного приладобудування. Розглянуто МЕМС та їх основні переваги та недоліки.
2. Розглянуто сучасні методи забезпечення стійкості приладів СОН в умовах інерційних збурень, а саме інтелектуальні інформаційні технології. Представлені типи інтелектуальних датчик. Перелічені цілі впровадження таких датчиків.
3. Детально розглянуто теорію надлишковості вимірювань, її завдання, переваги, приклади та види. Приведено проектні рішення при використанні інформаційно-надлишкових датчиків.
4. Розглянуто види мікромеханічних гіроскопів, їх принцип роботи, конструкції та основні характеристики.



## РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ММГ RR-ТИПУ

При виведенні рівнянь руху врахуємо кінцеву жорсткість пружних елементів (торсіонів) на кручення і згинання і будемо вважати, що основа з переносним обертанням піддається лінійному прискоренню, вібрації і поступальному переміщенню.

### 2.1. Виведення рівнянь руху ММГ RR-типу

Введемо наступні системи координат (рис. 2.1). З корпусом зв'язана система координат  $OXYZ$ . У початковий момент поздовжні осі торсіонів збігаються з осями  $OX$ ,  $OY$ . Основа обертається з кутовими швидкостями  $\Omega_x, \Omega_y$  поступально переміщається з лінійними прискореннями  $a_x, a_y, a_z$  (до складу  $a_z$ , включено прискорення сили тяжіння) і схильне до лінійної вібрації, відображеної у вигляді вібропереміщень  $x_B, y_B, z_B$  по відповідним осям. Внаслідок пружних зміщень підвісу його геометричний центр з точки  $O$  змістився в точку  $O_1$ , координати якої  $x, y, z$ . Осі системи координат  $O_1x'y'z'$  паралельні відповідним осям  $OXYZ$ . Положення системи координат  $O_1xyz$ , пов'язаної з ротором, відносно системи координат  $O_1x'y'z'$  визначено кутами  $\gamma, \alpha, \beta$ , послідовні повороти на які визначають системи координат  $O_1x_2y_2z_2$ ,  $O_1x_1y_1z_1$ , та  $O_1xyz$ . Положення ЦМ ротора в точці  $O_0$  визначено величинами  $\delta x, \delta y$  в площині  $xу$ . Осі системи координат  $O_0x_0y_0z_0$  паралельні відповідним осям системи координат  $O_1xyz$ .

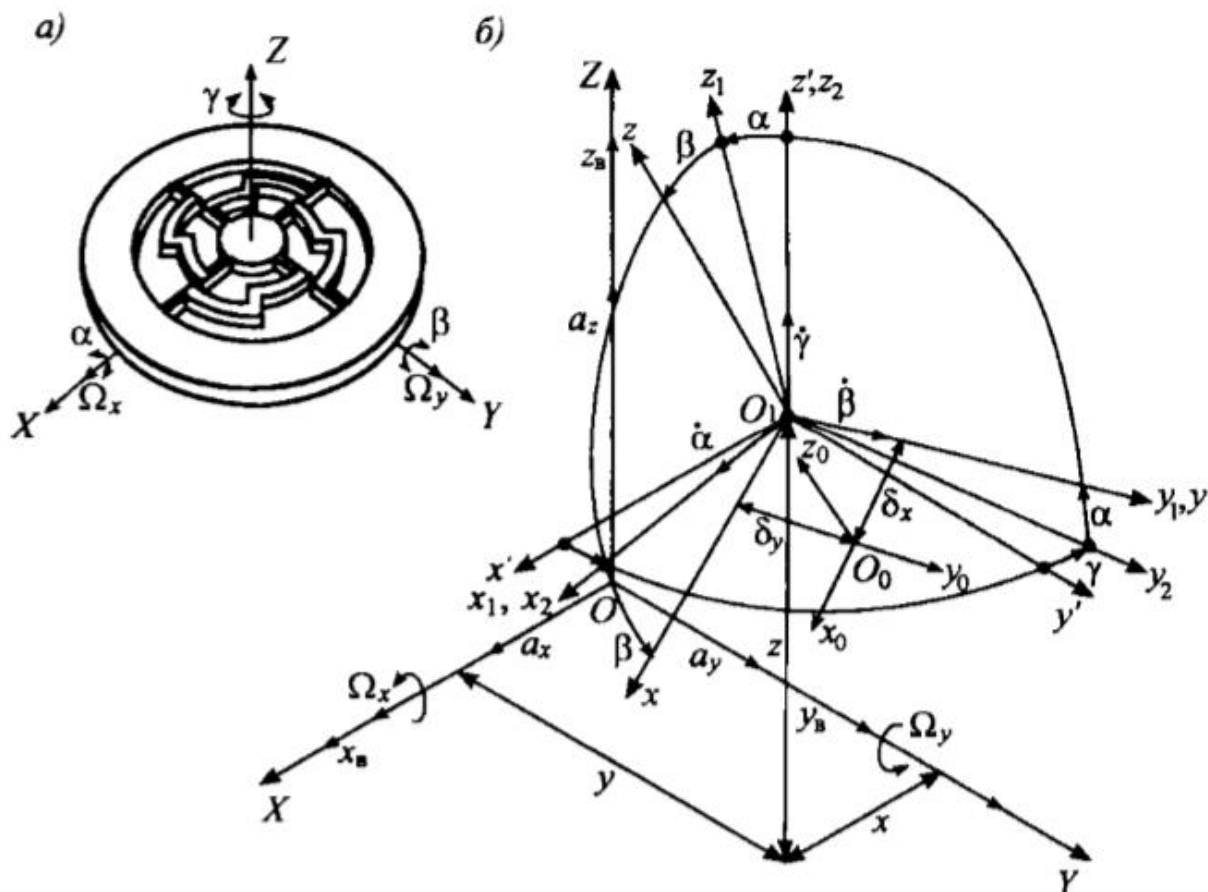


Рис. 2.1. Мікромеханічний гіроскоп RR-типу:

а) кінематична схема; б) система координат

Рівняння руху гіроскопа отримаємо, вибираючи в якості узагальнених координат в рівняннях Лагранжа величини  $\alpha, \beta, \gamma, x, y, z$ .

Будемо вважати, що через малі значень  $\delta x, \delta y$  в порівнянні з геометричними розмірами ротора і підвісу головні (щодо осей системи координат  $O_1xyz$ ) і головні центральні (щодо осей системи координат  $O_0x_0y_0z_0$ ) моменти інерції гіроскопа збігаються з точністю до значення величини  $m\delta_x^2$  і  $m\delta_y^2$  ( $m$  - маса ротора).

Вираз для кінетичної енергії ММГ має вигляд:

$$T = \frac{1}{2} [A_2 p_2^2 + B_2 q_2^2 + C_2 r_2^2 + A_1 p_1^2 + B_1 q_1^2 + C_1 r_1^2 + m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)], \quad (2.1)$$

де  $A_1, B_1, C_1$  – головні моменти інерції ротора;

$A_2, B_2, C_2$  – головні моменти інерції елементів підвісу, що переміщуються разом з ротором за координатами  $\alpha, \beta, \gamma$ ;

$p_2, q_2, r_2; p_1, q_1, r_1$  – проекції абсолютних кутових швидкостей на осі систем координат  $O_1x_1y_1z_1$  і  $O_1xyz$  відповідно;

$v_x, v_y, v_z$  – проекції абсолютної лінійної швидкості ЦМ на відповідні осі.

Потенційна енергія ММГ і дисипативна функція розсіювання енергії виглядають так:

$$\begin{cases} \Pi = \frac{1}{2}(G_\alpha \alpha^2 + G_\beta \beta^2 + G_\gamma \gamma^2 + G_x x^2 + G_y y^2 + G_z z^2) + W; \\ \Phi = \frac{1}{2}(b_\alpha \dot{\alpha}^2 + b_\beta \dot{\beta}^2 + b_\gamma \dot{\gamma}^2 + b_x \dot{x}^2 + b_y \dot{y}^2 + b_z \dot{z}^2), \end{cases} \quad (2.2)$$

де  $G_\alpha, G_\beta, G_\gamma, G_x, G_y, G_z$  – жорсткості підвісу по відповідним узагальненим координатам.

Проекції абсолютних кутових швидкостей ММГ мають вигляд:

$$\begin{aligned} p_2 &= \dot{\alpha} + \Omega_x \cos \gamma + \Omega_y \sin \gamma; \quad q_2 = \Omega_y \cos \gamma - \Omega_x \sin \gamma; \quad r_2 = \dot{\gamma}; \\ p_1 &= \dot{\alpha} \cos \beta + \Omega_x \cos \gamma \cos \beta + \Omega_y \sin \gamma \cos \beta - \dot{\gamma} \cos \alpha \sin \beta \\ q_1 &= \dot{\beta} + \dot{\gamma} \sin \alpha + \Omega_y \cos \gamma \cos \alpha - \Omega_x \sin \gamma \cos \alpha; \\ r_1 &= \dot{\gamma} \cos \alpha \cos \beta + \dot{\alpha} \sin \beta + \Omega_x \cos \gamma \sin \beta + \Omega_y \sin \gamma \sin \beta. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Координати ЦМ визначаються виразами:

$$\begin{cases} X = x + x_B + \delta_x \cos \beta \cos \gamma - \delta_y \cos \alpha \sin \gamma; \\ Y = y + y_B + \delta_y \cos \alpha \cos \gamma + \delta_x \cos \beta \sin \gamma; \\ Z = z + z_B + \delta_z \sin \alpha - \delta_x \sin \beta \cos \alpha, \end{cases}$$

а абсолютні лінійні швидкості ЦМ за координатами залежать від їх похідних за часом:

$$v_x = \dot{X}, \quad v_y = \dot{Y}, \quad v_z = \dot{Z}. \quad (2.4)$$

Обчисливши кінетичну енергію за формулою (2.1) з урахуванням виразів (2.3), (2.4), виконавши операції диференціювання відповідно до рівнянь Лагранжа другого роду (2.5):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j, \quad j = 1 \dots 5, \quad (2.5)$$

по узагальненим координатам і швидкостям, і визначивши узагальнені сили з урахуванням співвідношень (2.2) і діючих на гіроскоп прискорень, вважаючи далі, що величини  $\alpha, \beta, \gamma, x, y, z$  малі і  $\dot{\gamma} \gg \dot{\Omega}_x, \dot{\Omega}_y$ , рівняння руху ММГ можна привести до виду:

$$\begin{aligned} (A_2 + A_1)\ddot{\alpha} + b_\alpha \dot{\alpha} + [G_\alpha - (B_1 + B_2 - C_1 - C_2)\dot{\gamma}^2]\alpha - (A_1 + B_1 - C_1)\dot{\gamma}\dot{\beta} = \\ = -(C_2 + B_2 - A_2 + C_1 + B_1 - A_1)\dot{\gamma}\Omega_y - (A_1 + A_2)\dot{\Omega}_x - \\ - m(\ddot{z} + \ddot{z}_B)\delta_y + ma_z\delta_y - \frac{\partial W}{\partial \alpha}; \\ B_1\ddot{\beta} + b_\beta \dot{\beta} + [G_\beta + (C_1 - A_1)\dot{\gamma}^2]\beta + (A_1 + B_1 - C_1)\dot{\gamma}\dot{\alpha} = \\ = -(C_1 + B_1 - A_1)\dot{\gamma}\Omega_x - B_1\dot{\Omega}_y + m(\ddot{z} + \ddot{z}_B)\delta_x - ma_z\delta_z - \frac{\partial W}{\partial \beta}; \\ C_1\ddot{\gamma} + (b_\gamma + A_1\Omega_x\alpha + B_1\Omega_y\beta)\dot{\gamma} + G_\gamma\gamma = M_0 \sin pt + m[(\ddot{x} + \ddot{x}_B)\delta_y - \\ - (\ddot{y} + \ddot{y}_B)\delta_x] + m(a_y\delta_x - a_x\delta_y); \quad (2.6) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b_x\dot{x} + (G_x - m\dot{\gamma}^2)x - 2m\dot{y}\dot{\gamma} = m(a_x - \ddot{x}_B + \delta_y\ddot{\gamma}) - \frac{\partial W}{\partial x}; \\ m\ddot{y} + b_y\dot{y} + (G_y - m\dot{\gamma}^2)y - 2m\dot{x}\dot{\gamma} = m(a_y - \ddot{y}_B - \delta_x\ddot{\gamma}) - \frac{\partial W}{\partial y}; \\ m\ddot{z} + b_z\dot{z} + G_z z = m(a_z - \ddot{z}_B - \delta_y\ddot{\alpha} + \delta_x\ddot{\beta}) - \frac{\partial W}{\partial z}, \end{cases} \quad (2.7)$$

де  $b_\alpha, b_\beta, b_\gamma, b_x, b_y, b_z$  – коефіцієнти демпфірування за відповідними координатами;

$M_0, p$  – амплітуда і частота моменту двигуна (вібропривід) по координаті  $\gamma$ . Рівняння (2.6), (2.7) описують динаміку ММГ по шести узагальнених координатах з

урахуванням масоінерційної несиметрії ротора і підвісу, і збурень, обумовлених лінійним і кутовим переносним рухом основи.

У відомих конструкціях ММГ RR-типу маса ротора на декілька порядків більша за масу підвісу, тому можна вважати  $A_2 = B_2 = C_2 = 0$ .

Для випадку  $\delta_x = \delta_y = 0$  рівняння руху приймають вид:

$$\begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + b_\alpha \dot{\alpha} + [G_\alpha + (C_1 - B_1) \dot{\gamma}^2] \alpha - (A_1 + B_1 - C_1) \dot{\gamma} \dot{\beta} = \\ \quad = -(C_1 + B_1 - A_1) \dot{\gamma} \Omega_y - A_1 \dot{\Omega}_x - \frac{\partial W}{\partial \alpha} \\ B_1 \ddot{\beta} + b_\beta \dot{\beta} + [G_\beta + (C_1 - A_1) \dot{\gamma}^2] \beta + (A_1 + B_1 - C_1) \dot{\gamma} \dot{\alpha} = \\ \quad = -(C_1 + B_1 - A_1) \dot{\gamma} \Omega_x - B_1 \dot{\Omega}_y - \frac{\partial W}{\partial \beta} \\ C_1 \ddot{\gamma} + (b_\gamma + A_1 \Omega_x \alpha + B_1 \Omega_y \beta) \dot{\gamma} + G_\gamma \gamma = M_0 \sin pt \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} m \ddot{x} + b_x \dot{x} + (G_x - m \dot{\gamma}^2) x - 2m \dot{y} \dot{\gamma} = m(a_x - \ddot{x}_B) - \frac{\partial W}{\partial x}; \\ m \ddot{y} + b_y \dot{y} + (G_y - m \dot{\gamma}^2) y + 2m \dot{x} \dot{\gamma} = m(a_y - \ddot{y}_B) - \frac{\partial W}{\partial y}; \end{cases} \quad (2.9)$$

$$m \ddot{z} + b_z \dot{z} + G_z z = m(a_z - \ddot{z}_B) - \frac{\partial W}{\partial z} \quad (2.10)$$

Системи рівнянь (2.8), (2.9) і рівняння (2.10) є незалежними.

Скористаємося рівняннями (2.8), в яких знехтуємо членами  $(A_1 + B_1 - C_1) \dot{\gamma} \dot{\beta}$  та  $(A_1 + B_1 - C_1) \dot{\gamma} \dot{\alpha}$ , так як їх вплив проявляється у виникненні коливань на подвоєній частоті по відношенню до частоти первинних коливань з амплітудою, на кілька порядків меншою амплітуди коливань, обумовлених вимірюваними швидкостями. Будемо вважати, що гіроскопічні моменти в правих частинах рівнянь (2.8) більше моментів  $A_1 \dot{\Omega}_x$  і  $B_1 \dot{\Omega}_y$ , знехтуємо дією електро-статичних сил, введемо позначення  $J_\alpha = A_1$ ,  $J_\beta = B_1$ ,  $J_\gamma = C_1$ ,  $J_\alpha = -A_1 + B_1 + C_1$  і запишемо систему (2.8) у вигляді незалежних рівнянь:

$$J_\alpha \ddot{\alpha} + b_\alpha \dot{\alpha} + G_\alpha^* \alpha = J_0 \dot{\gamma} \Omega_y; \quad (2.11)$$

$$J_\beta \ddot{\beta} + b_\beta \dot{\beta} + G_\beta^* \beta = J_0 \dot{\gamma} \Omega_x; \quad (2.12)$$

$$J_\gamma \ddot{\gamma} + b_\gamma \dot{\gamma} + G_\gamma \gamma = M_B(t), \quad (2.13)$$

де

$$M_B(t) = M_0 \sin pt; G_\alpha^* = G_\alpha + (C_1 - B_1)\dot{\gamma}^2; G_\beta^* = G_\beta + (C_1 - A_1)\dot{\gamma}^2 \quad (2.14)$$

У рівняннях (2.11), (2.12) жорсткості  $G_\alpha^*$ ,  $G_\beta^*$  відповідно до рівняннями (2.8) складаються з жорсткостей пружних елементів  $G_\alpha$ ,  $G_\beta$  і так званих квазіпружних жорсткостей, пропорційних величині  $\dot{\gamma}^2$ . З урахуванням квазіпружних жорсткостей частоти власних коливань ММГ по вихідним координатам визначаються по формулам:

$$\omega_{\alpha 0} = \sqrt{G_\alpha^*/A_1}; \quad \omega_{\beta 0} = \sqrt{G_\beta^*/B_1}. \quad (2.15)$$

Для великих  $\dot{\gamma}$  частоти (2.15) можуть значно відрізнятися від їх значень без урахування квазіпружних жорсткостей [8].

## 2.2. Вплив лінійної вібрації основи на ММГ

Будемо оцінювати вплив лінійної вібрації основи на ММГ з нерівножорстким пружним підвісом.

На рис. 2.2 показана схема ММГ з первинними коливаннями по осі OZ, (координата  $\gamma$ ) і вторинними відносно осі OX (вихідна координата  $\alpha$ ). Кутова швидкість, яка вимірюється –  $\Omega_y$ .

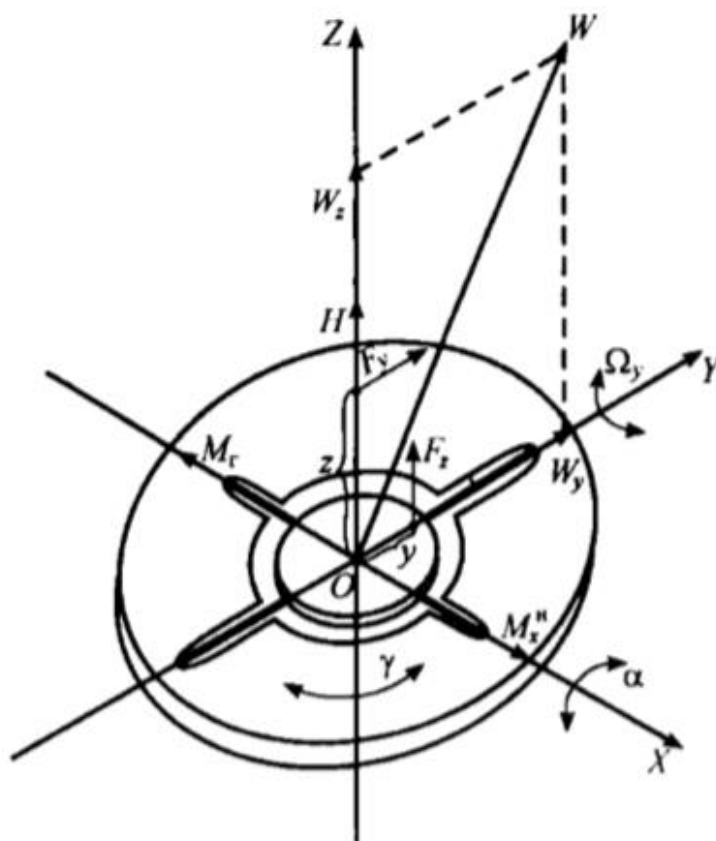


Рис. 2.2. Схема ММГ під дією лінійної вібрації.

Найбільший вплив на похибку ММГ при вимірюванні кутової швидкості  $\Omega_y$  буде надавати лінійна вібрація в площині  $YZ$ . Момент  $M_x^H$ , обумовлений нерівножорсткістю підвісу і інерційними силами, що діють на ротор внаслідок віброприскорення  $W$ , впливає так само як гіроскопічний момент  $M_\Gamma = H\Omega_y$  навколо вихідної осі  $OX$ .

З огляду на рис. 2.2 маємо:

$$M_x^H = F_z y - F_y z, \quad (2.16)$$

$$\text{де } F_y = -mW_y; \quad F_z = -mW_z; \quad y = \frac{mW_y}{G_y}; \quad z = \frac{mW_z}{G_z};$$

$m$  – маса ротора;  $W_y, W_z$  – віброприскорення в напрямку відповідних осей;  
 $G_y, G_z$  – жорсткості пружного підвісу в напрямку відповідних осей.

Приведемо рівність (2.16) у такий вид:

$$\begin{aligned} M_x^H &= -m^2 W_y W_z \left( \frac{1}{G_y} - \frac{1}{G_z} \right) = -m W_y W_z \left( \frac{1}{\omega_{y0}^2} - \frac{1}{\omega_{z0}^2} \right) = \\ &= \frac{m W_y W_z}{\omega_{z0}^2} \left( 1 - \frac{\omega_{z0}^2}{\omega_{y0}^2} \right), \end{aligned} \quad (2.17)$$

де  $\omega_{y0}, \omega_{z0}$  – частоти власних коливань ММГ в напрямку відповідних осей.

Додаємо в розгляд коефіцієнт нерівножорсткості підвісу:

$$K_{yz}^H = 1 - \omega_{z0}/\omega_{y0} \quad (2.18)$$

і перепишемо вираз (2.17) у вигляді:

$$M_x^H = (K_{yz}^H m W_y W_z) / \omega_{z0}^2. \quad (2.19)$$

При рівності  $\omega_{z0} = \omega_{y0}$  (підвіс рівножорсткий)  $M_x^H = 0$ .

Припустимо, що складові віброприскорень мають однакові частоти  $\omega_B$ , але зміщені по фазі впливу  $\psi$ :

$$W_y = W_0 \sin \omega_B t; \quad W_z = W_0 \sin(\omega_B t + \psi),$$

де  $W_0 = W_y = W_z$  – амплітуда віброприскорення.

Приведемо до наступного виду:

$$W_y W_z = W_0^2 \left[ (1 - \cos^2 \omega_B) \cos \psi + \frac{1}{2} \sin(2\omega_B t) \sin \psi \right], \quad (2.20)$$

звідси, відповідно до (2.19) випливає, що мають місце постійна складова збурюючого моменту і складова на подвоєній частоті вібрації. З виразу (2.20) можна побачити, що при  $\omega_B = \frac{\omega_{\alpha 0}}{2}$  ( $\omega_{\alpha 0}$  – частота власних коливань ММГ відносно вихідної осі) спостерігається резонансне посилення моменту  $M_x^H$ , оскільки його частота зміни дорівнює частоті  $\omega_{\alpha 0}$ .



Для того щоб вплив нерівножорсткості був мінімальним, необхідно дотримуватись нерівності:

$$M_{\Gamma} = H_0 \Omega_y \gg (K_{yz}^H m W_0^2) / \omega_{z0}^2, \quad (2.21)$$

звідси отримаємо обмеження на коефіцієнт нерівножорсткості:

$$K_{yz}^H \leq \frac{H_0 \Omega_y \omega_{z0}^2}{m W_0^2}. \quad (2.22)$$

З формули (2.22) можна зробити висновок, що коефіцієнт нерівно-жорсткості тим більше, чим більше частота  $\omega_{z0}$ , але в силу малої товщини ротора в порівнянні з його діаметром важко отримати високе значення  $\omega_{z0}$ , тому що ротор при дії великих вібраційних збурень деформується.

З виразу (2.21) може бути отримано обмеження на максимальну величину амплітуди вібрації:

$$W_0 \leq \omega_{z0} \sqrt{\frac{H_0 \Omega_y}{K_{yz}^H m}}. \quad (2.23)$$

Для реальних параметрів ММГ різниця в частотах  $\omega_{y0}$  і  $\omega_{z0}$  істотна і значення коефіцієнта нерівножорсткості наближається до одиниці, внаслідок чого посилюється вплив лінійної вібрації на похибки ММГ.

Лінійна вібрація при коефіцієнті нерівножорсткості  $K_{yz}^H \rightarrow 1$  може призводити до суттєвих спотворень вторинних (вихідних) коливань ММГ. При цьому потрібно мати на увазі, що збурюючий момент має частоту вторинних коливань і тому його не можна усунути за допомогою фільтрації вихідного сигналу ММГ.

При  $\omega_b < 0,5\omega_{\alpha 0}$  резонансне посилення збурюючого моменту, обумовлене нерівножорсткістю підвісу, відсутнє, тобто відпадає вимога до рівножорсткості підвісу. Очевидно, в цьому випадку висновок про вплив його нерівножорсткості треба робити на підставі рівності:

$$M_x^H = H_0 \Omega_y \Omega_x, \quad (2.24)$$

де  $M_x^H$  визначається по формулі (2.19).

Для зниження впливу лінійної вібрації на вихідний сигнал ММГ необхідно:

- зменшити коефіцієнт нерівножорсткості підвісу в площині, яка перпендикулярна до осі вторинних (вихідних) коливань ротора;
- збільшити частоту власних коливань ротора (при цьому можна застосовувати методи фільтрації для виділення корисного сигналу);
- контролювати частоту вібраційних збурень, яка повинна бути меншою половини частоти власних коливань ММГ відносно вихідної осі.

### Висновки до розділу

1. В розділі представлені рівняння руху мікромеханічного гіроскопу RR-типу, які отримані методом Лагранжа II-го роду.
2. Проведена оцінка впливу лінійної вібрації основи на ММГ з нерівножорстким підвісом. Отримано обмеження на максимальну амплітуду вібрації  $W_0$  та коефіцієнт нерівножорсткості  $K_{yz}^H$ .
3. Визначені традиційні заходи для зниження впливу лінійної вібрації на вихідний сигнал ММГ.

### РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПУ RR-ТИПУ ПРИ ДІЇ ВІБРАЦІЙНИХ ЗБУРЕНЬ

#### 3.1 Розробка математичної моделі ММГ

Для аналізу системи диференціальних рівнянь було обрано програмне середовище MATLAB 2018a та пакет Simulink. Дані середовища дозволяють полегшити складання обчислювальних програм чисельного моделювання завдяки візуальному програмуванню шляхом додавання блоків із бібліотеки Simulink до схеми.

Для побудови програмної моделі ЧЕ ММГ перепишемо рівняння (2.13) та (2.11) у форму Коші:

$$\ddot{\gamma} = M_0 \sin pt - b_\gamma \dot{\gamma} - G_\gamma \gamma$$

$$\ddot{\alpha} = H\Omega - b_\alpha \dot{\alpha} - G_\alpha \alpha \quad (3.1)$$

З першого рівняння системи 3.1 знаходимо величину  $\dot{\gamma}$  амплітуда якої після завершення перехідного процесу її можна рахувати постійною. Друге рівняння системи 3.1, маючи на увазі постійність величини  $\dot{\gamma}$ , може бути записано у вигляді:

$$\ddot{\alpha} = J_0 \dot{\gamma} \Omega - 2\xi_a \omega_{a_0} \dot{\alpha} - \omega_{a_0}^2 \alpha, \quad (3.2)$$

де  $J_0 \dot{\gamma} = H$  – кінетичний момент;

$\omega_{a_0} = \sqrt{\frac{G_a}{J_a}}$  – власна частота коливань внутрішньої рамки відносно осі  $Ox_1$ .

$\xi_a = \frac{b_a}{2\omega_{a_0} J_a}$  – відносний коефіцієнт демпфування внутрішньої рамки відносно осі  $Ox_1$ .

Параметри та коефіцієнти програмної моделі приймаємо наступними:

$M_0 = 5e - 10$  (м) – амплітуда коливань відносно осі  $Oy$ ;

$p = 3.8742e4$  (1/c) – частота коливань відносно осі Oy;

$m = 2 * 10^{-7}$  (кг) – маса ротора;

$J_0 = 2.5e-13$  (кг\*м<sup>2</sup>) – момент інерції ротора;

$H = 0.86 * 10^{-10}$  (кг\*м<sup>2</sup>/с); – кінетичний момент ротора;

$b_\alpha = 8e - 12$  (с<sup>-1</sup>) – коефіцієнт демпфування навколо осі Oх;

$b_\gamma = 4.3e - 13$  (с<sup>-1</sup>) – коефіцієнт демпфування навколо осі Oy;

$G_\gamma = 43.38e - 2$  (1/с<sup>2</sup>) – жорсткість пружних елементів підвісу зовнішньої рамки на кручення відносно осі Oy;

$G_\alpha = 23.8e - 6$  (1/с<sup>2</sup>) – жорсткість пружних елементів підвісу зовнішньої рамки на кручення відносно осі Oх;

$J_\gamma = 2.5e-9$  (кг\*м<sup>2</sup>) – момент інерції внутрішньої рамки відносно осі Oх<sub>1</sub>;

$J_\gamma = 1e-13$  (кг\*м<sup>2</sup>);

$\xi_\alpha = 5e - 2$  – відносний коефіцієнт демпфування внутрішньої рамки відносно осі Oх<sub>1</sub>.

На Рис. 3.1 представлена блок - схема для інтегрування рівняння руху чутливого елементу по координаті  $\gamma$  ( перше рівняння системи 3.1.). Для цього використані стандартні блоки: складання, підсилення та інтегрування, а також блоки для виведення змінних в робочий простір та формування синусоїдального сигналу.

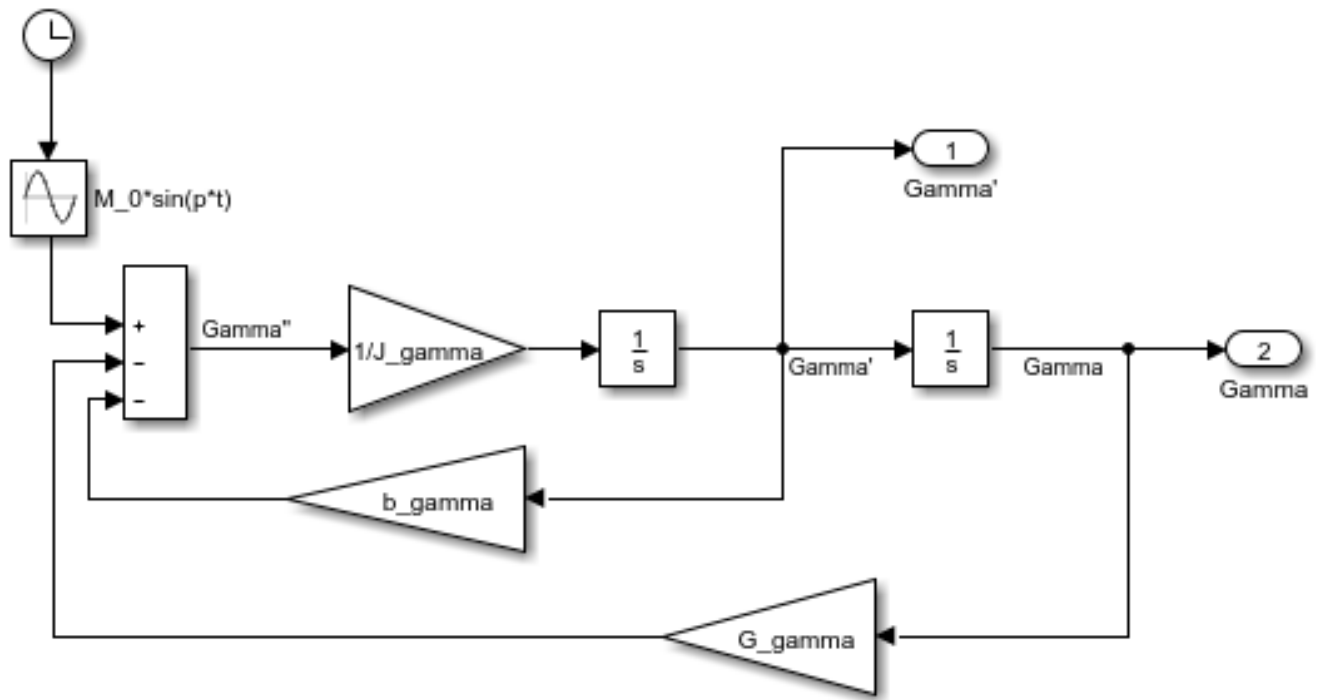


Рис. 3.1. Інтегрування рівняння руху ЧЕ ММГ по каналу  $\gamma$ .

Блок-схема інтегрування руху ЧЕ по каналу  $\alpha$  рис. 3.2:

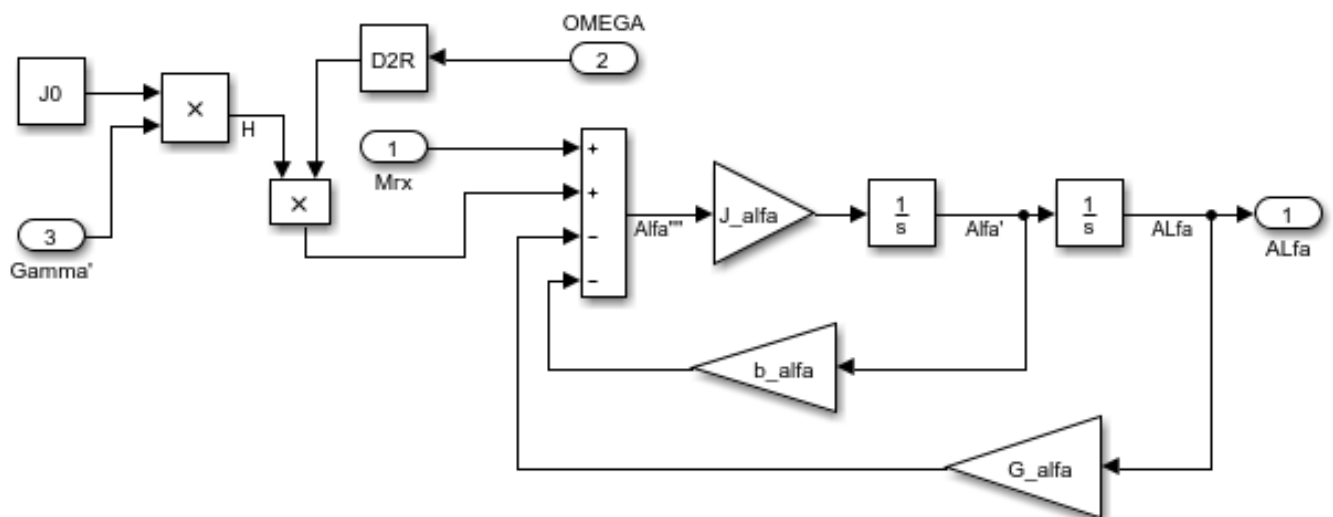


Рис. 3.2. Інтегрування рівняння руху ЧЕ по каналу  $\alpha$ .

Загальна блок-схема програмної моделі ММГ RR-типу представлено на рис. 3.3.

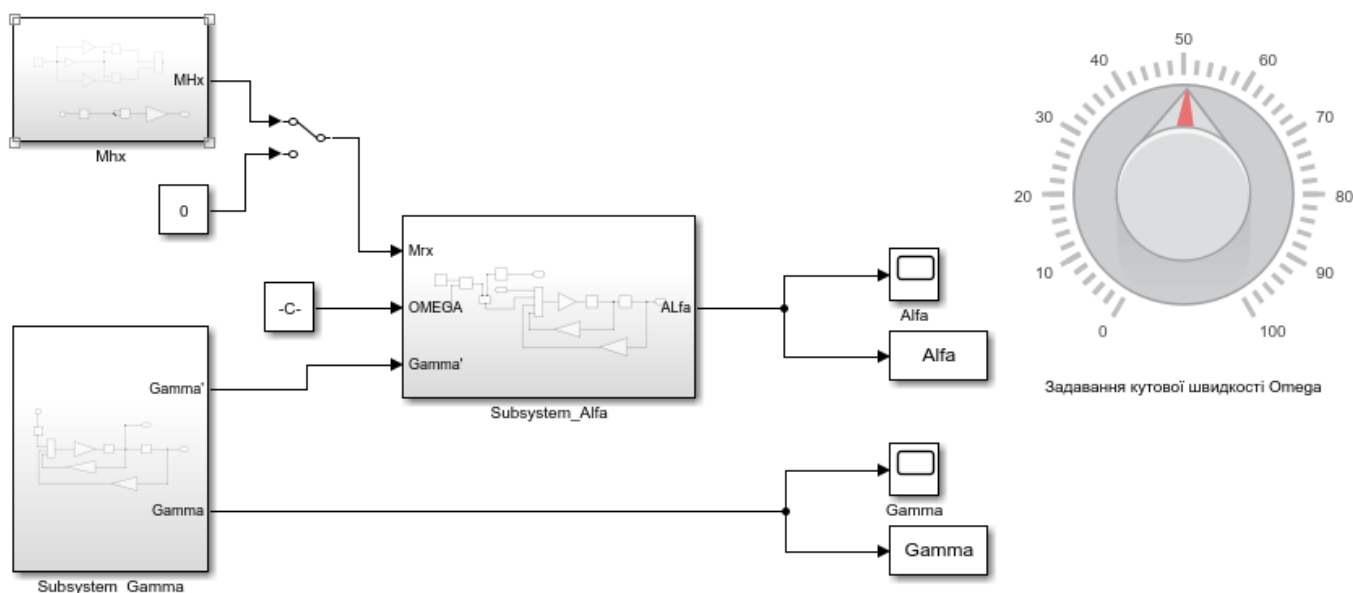


Рис. 3.3. Блок-схема Simulink для інтегрування рівнянь руху ЧЕ ММГ.

Початкові умови для зручнішої роботи задавались через m-файл, код якого представлений у Додатку А. Блок для формування вимірюваної кутової швидкості  $\Omega$  представлено у вигляді тумблера на рис. 3.3.

### 3.2. Оцінка на адекватність програмної моделі руху ЧЕ ММГ

Для коректної роботи та правильності проведення досліджень необхідно дослідити адекватність програмної моделі. Для цього спочатку проаналізовано чи буде система реагувати на відсутність зовнішніх збурень, при відсутності кутової швидкості основи та нульових початкових умовах.

Система не відреагувала на задані початкові умови, що говорить про її адекватну поведінку під час перевірки моделі руху ЧЕ.

Для початкових умов каналу  $\alpha$  ( $\alpha(0) = 0.01$ ,  $\dot{\alpha}(0) = 0.01$ ), та при заданому коефіцієнті демпфування  $b_{\alpha} = 3.3e - 6$ , результати моделювання поведінки ЧЕ показані на рис. 3.4.

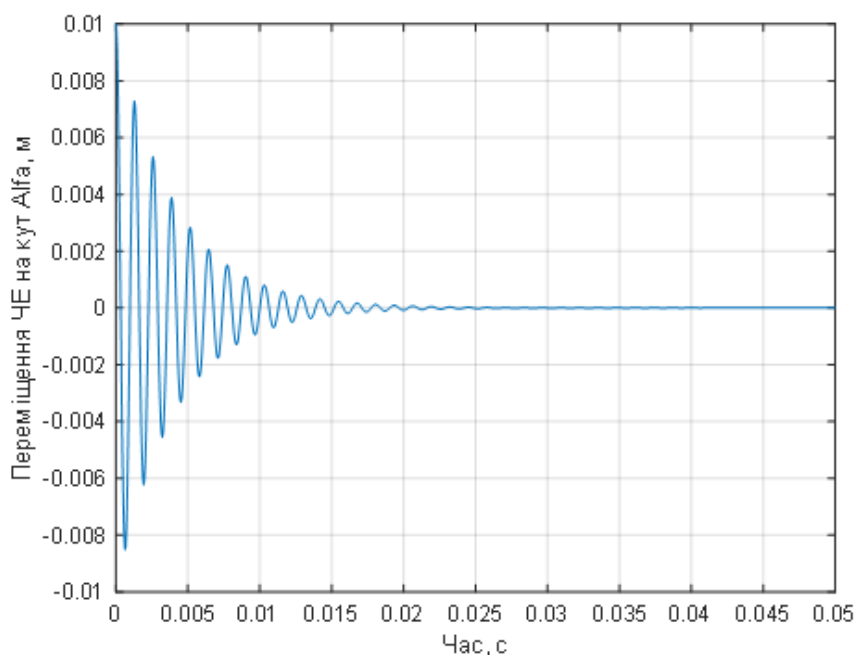


Рис. 3.4.  $b_{\alpha} = 6.6e - 6$  сигнал на виході з каналу  $\alpha$

На рис 3.4. спостерігається перехідний процес на виході каналу вимірювання  $\alpha$ , що зумовлений заданими початковими умовами. З графіку видно, що перехідний процес протікає досить швидко, що притаманне мікро-механічним гіроскопам. Результати моделювання для іншого коефіцієнту демпфування ( $b_{\alpha} = 4.6e - 6$ ) представлено на рис. 3.5.

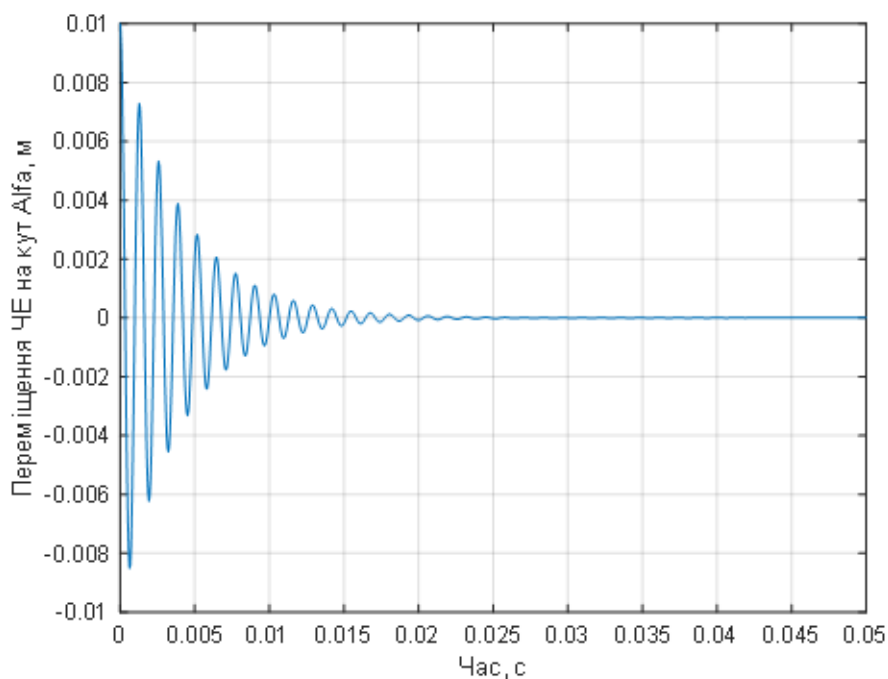


Рис. 3.5. Сигнал на виході каналу  $\alpha$

Аналогічні дослідження проведемо для початкових умов  $\gamma$  ( $\gamma(0) = 0.001, \dot{\gamma} = 0.001$ ) та при заданому коефіцієнті демпфування,  $b_\gamma = 4.9e - 11$  результат представлено на рис. 3.6:

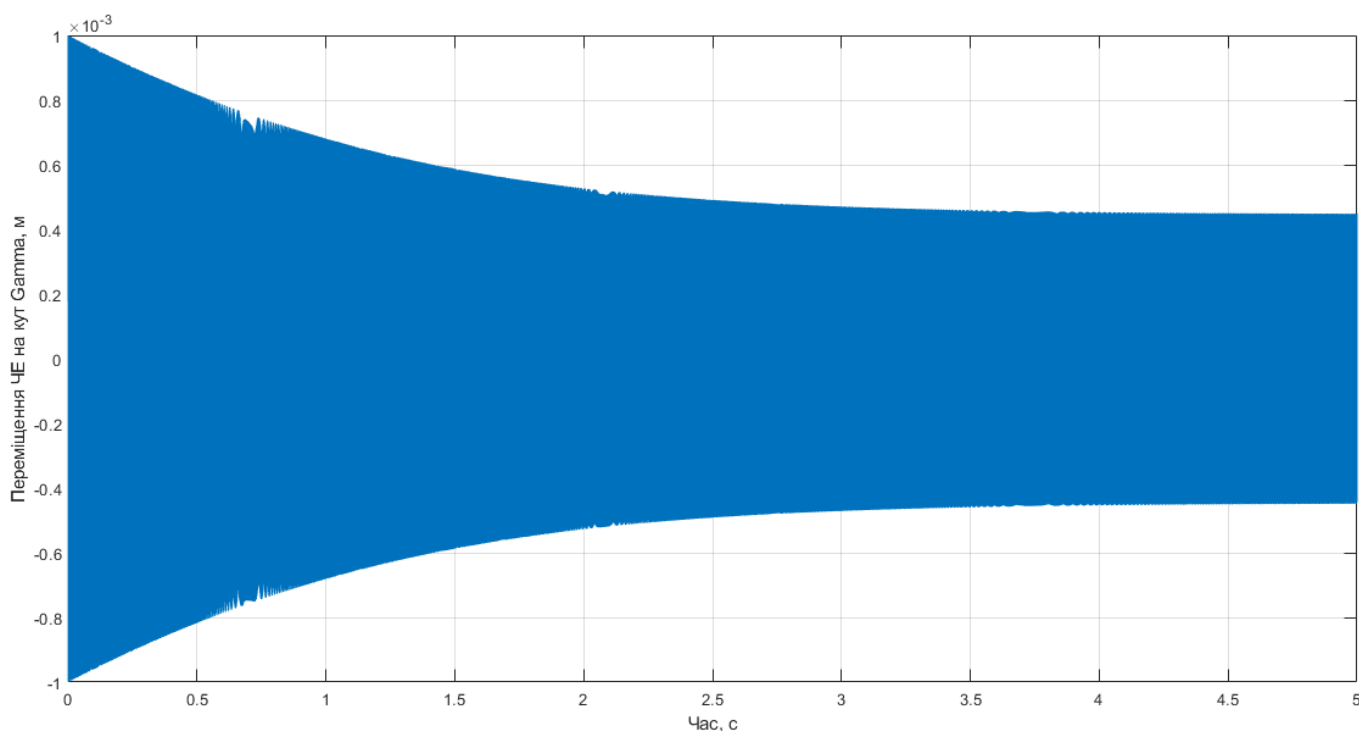


Рис. 3.6. Перехідний процес по каналу  $\gamma$

Для іншого коефіцієнта демпфування  $b_\gamma = 4.9e - 13$ , результати моделювання представлені на рис. 3.7.



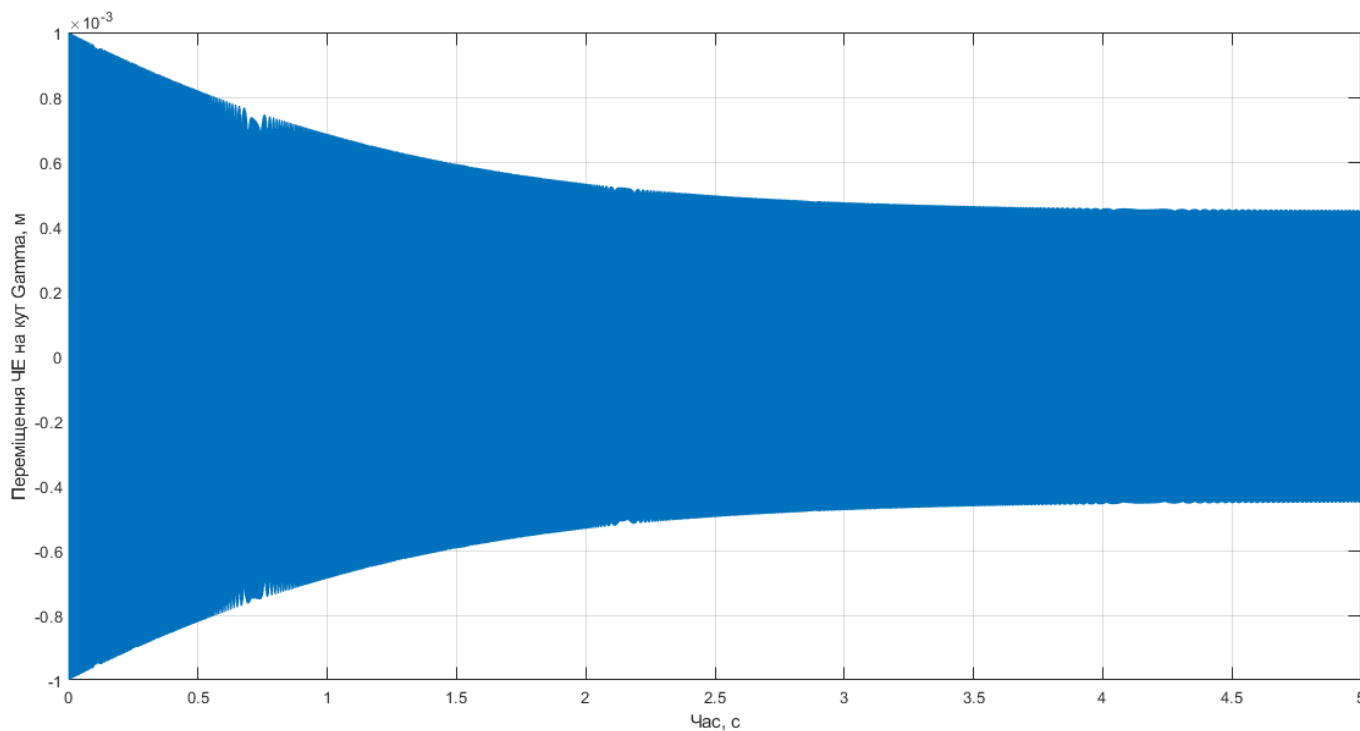


Рис. 3.7.  $b_\gamma = 4.9e - 13$  Перехідний процес по каналу  $\gamma$

Як видно з результату моделювання, перехідний процес з часом затухає, що відповідає побудованій моделі.

Перевіримо, як веде себе ЧЕ при нульовій кутовій швидкості обертання основи  $\Omega$ , з'єм інформації проводиться по каналу  $\alpha$ , результат представлено на рис. 3.8:

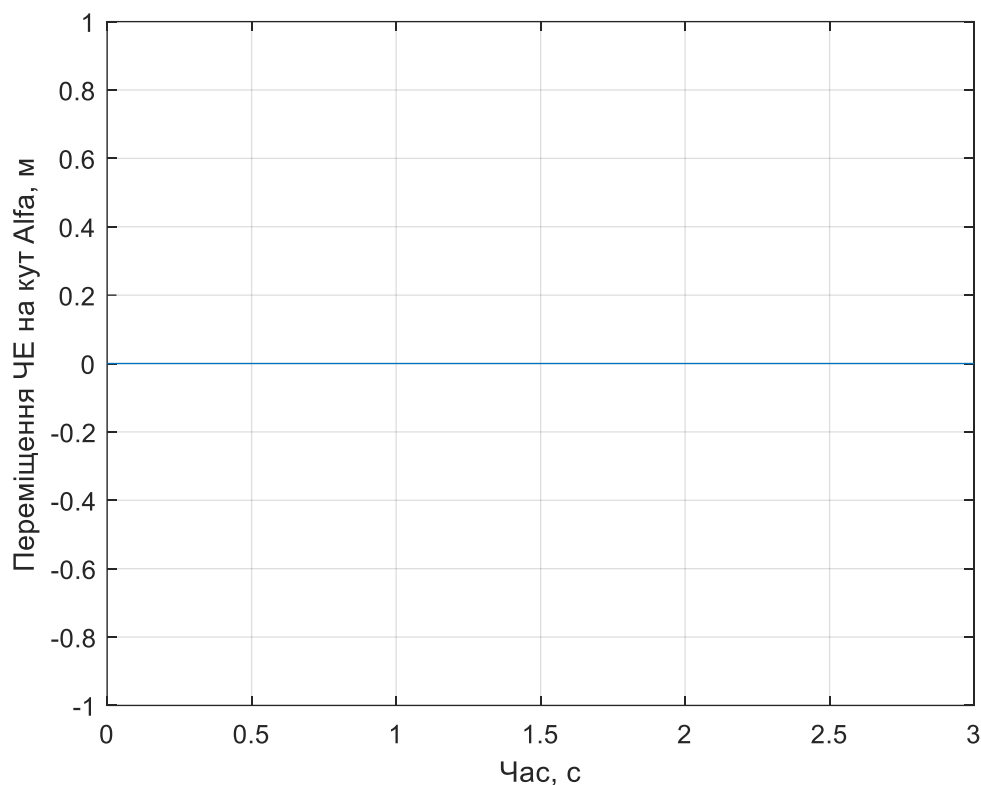
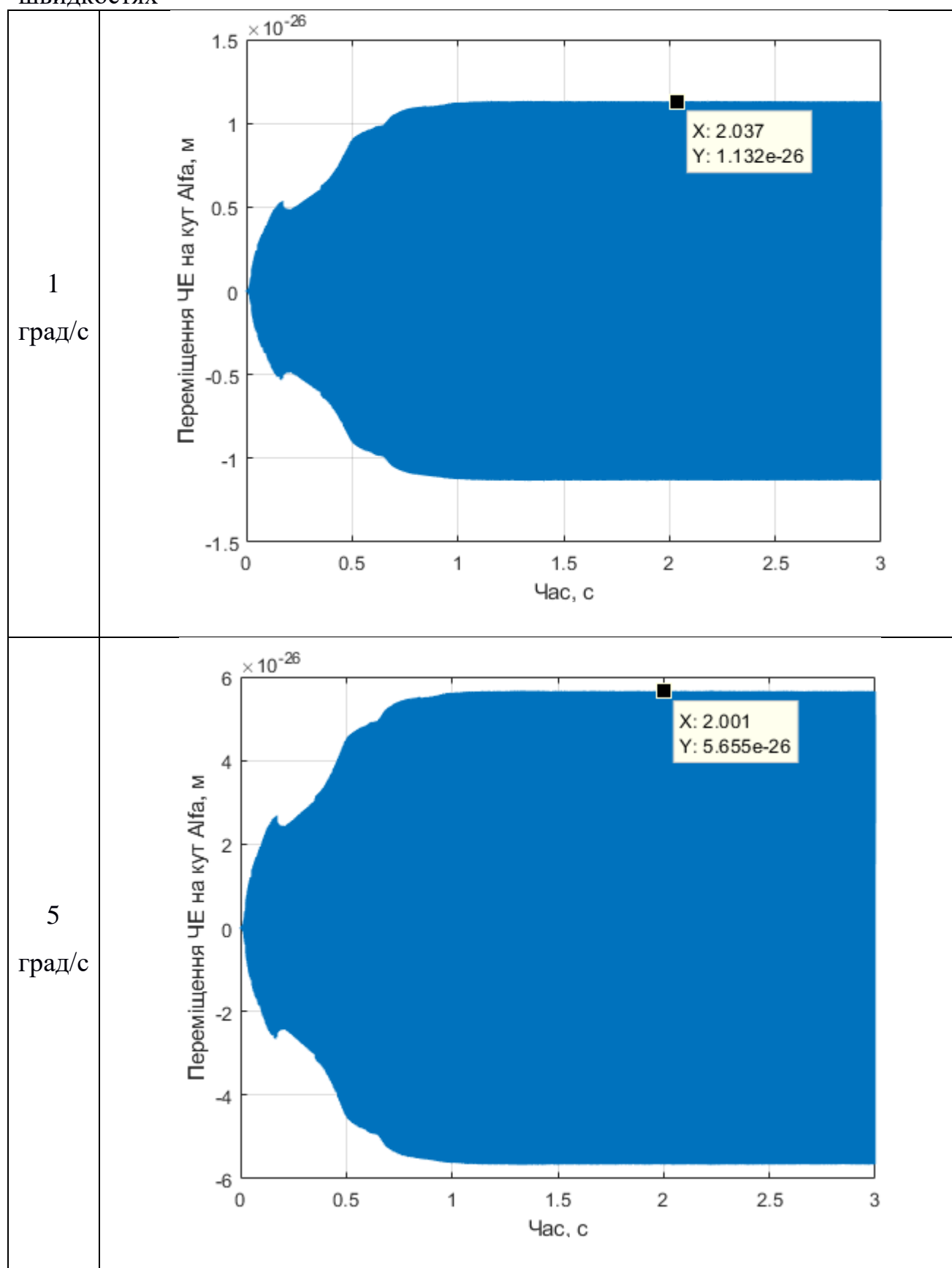


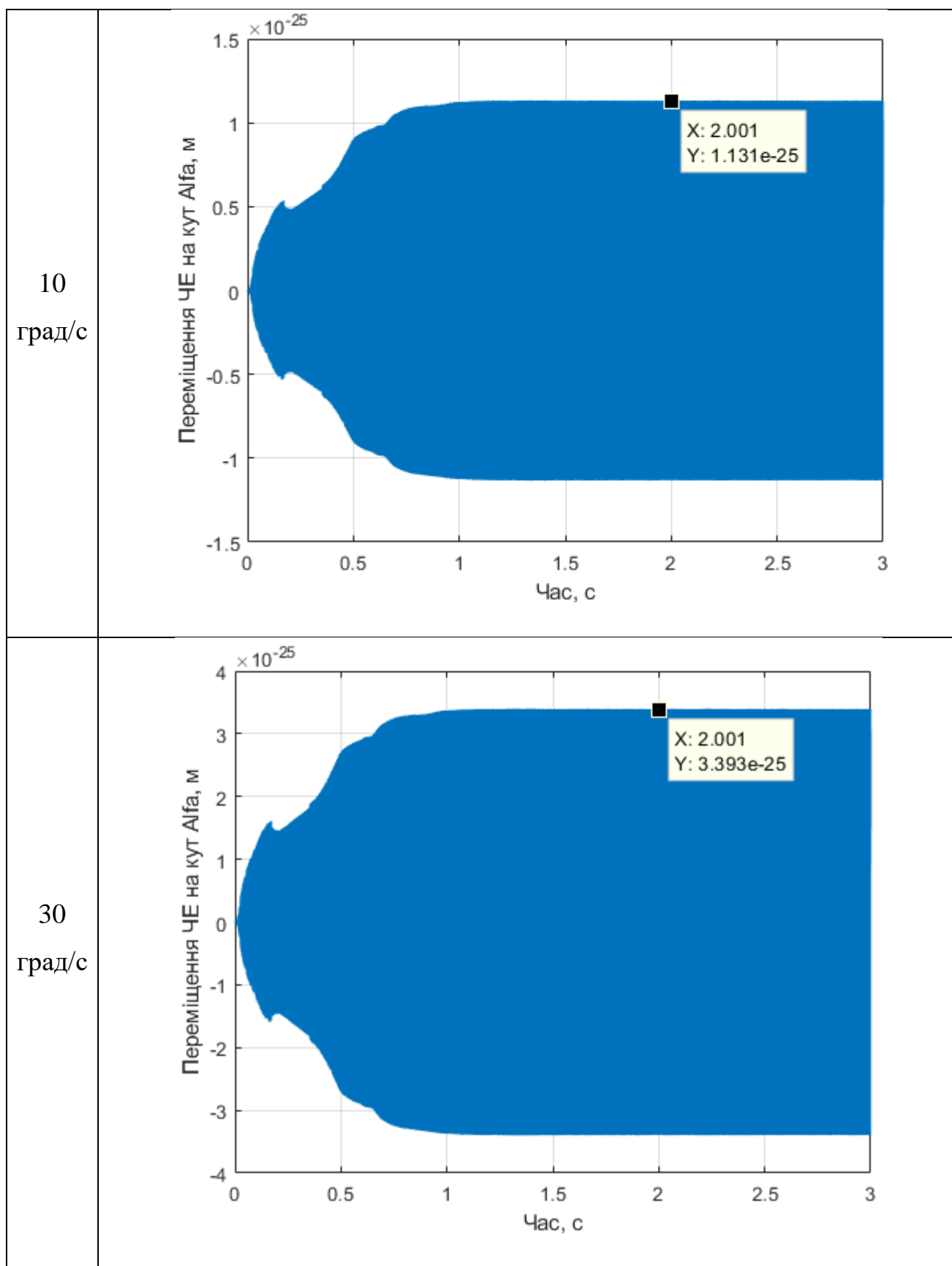
Рис. 3.8. Обертання основи відсутнє,  $\Omega = 0$ .

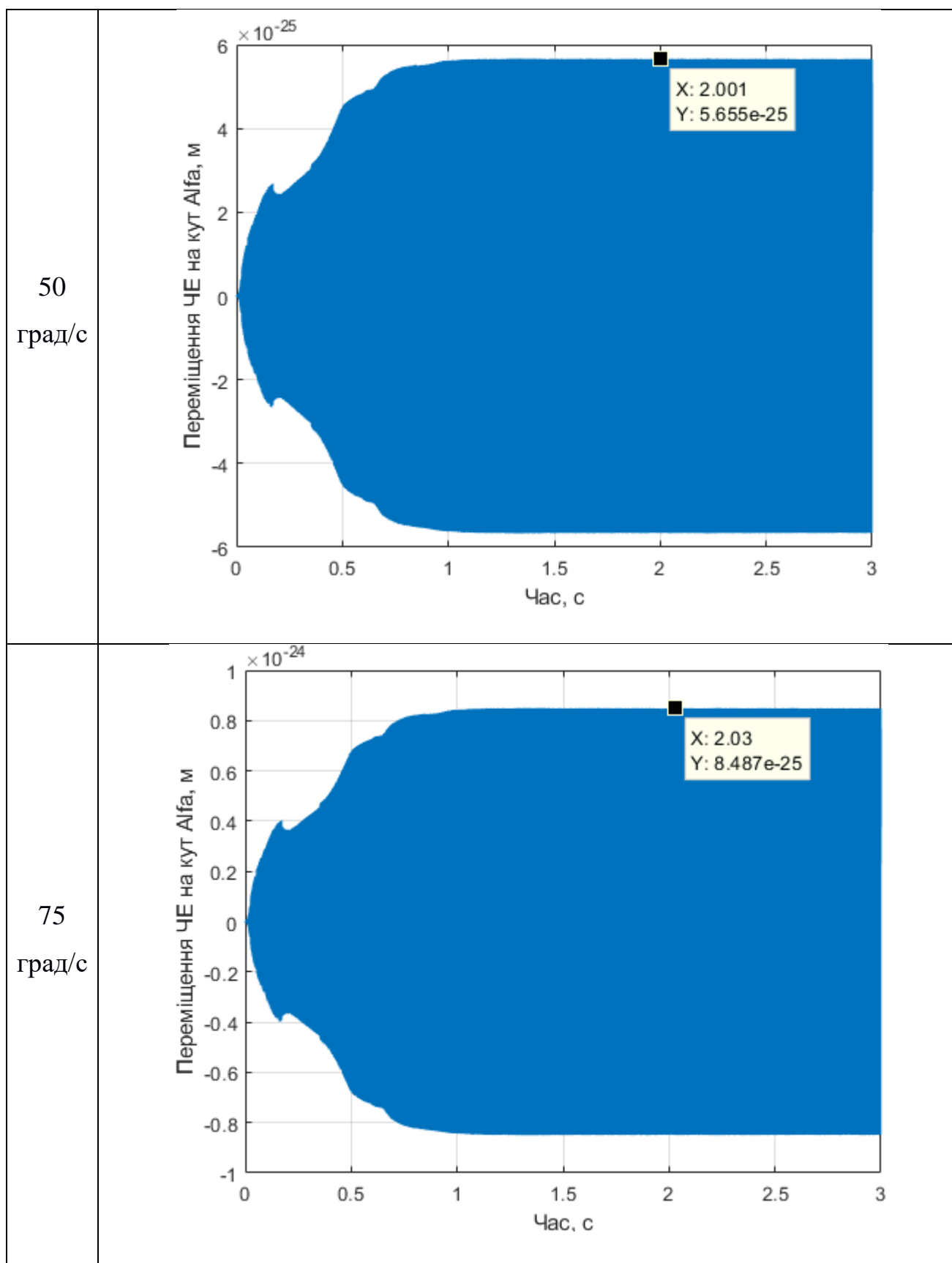
Після перевірки програмної моделі при нульовій кутовій швидкості  $\Omega$  потрібно перевірити як програмна модель ММГ буде реагувати на кутову швидкість, що може вимірювати ММГ.

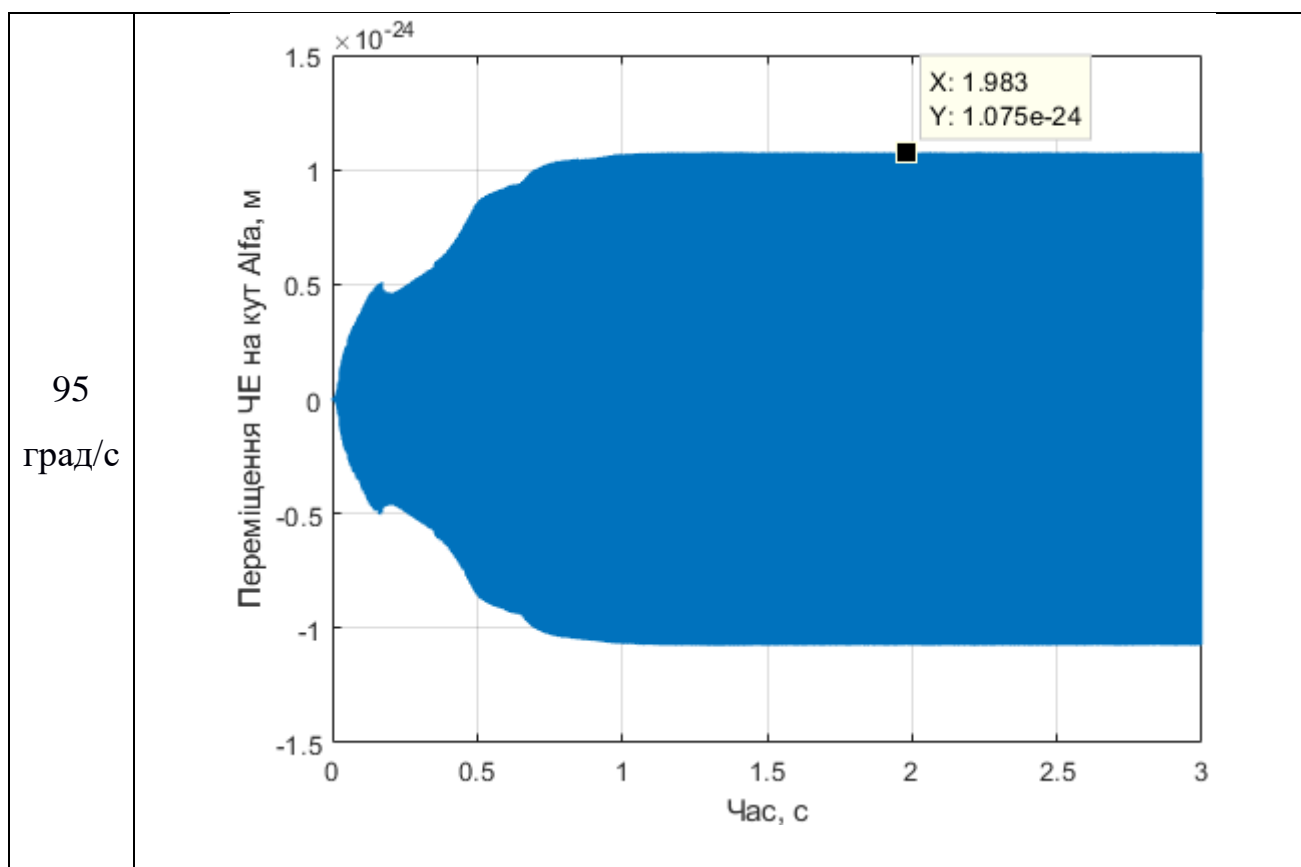
Будемо задавати кутову швидкість  $\Omega$  в град/с починаючи з 1 далі 5, 10, 30, 50, 75, 95. Результати представлені в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1. Дослідження амплітуди коливань ЧЕ ММГ при різних кутових швидкостях









На основі отриманих даних було побудовано графік залежності амплітуди переміщення ЧЕ ММГ від заданої кутової швидкості рис. 3.7.

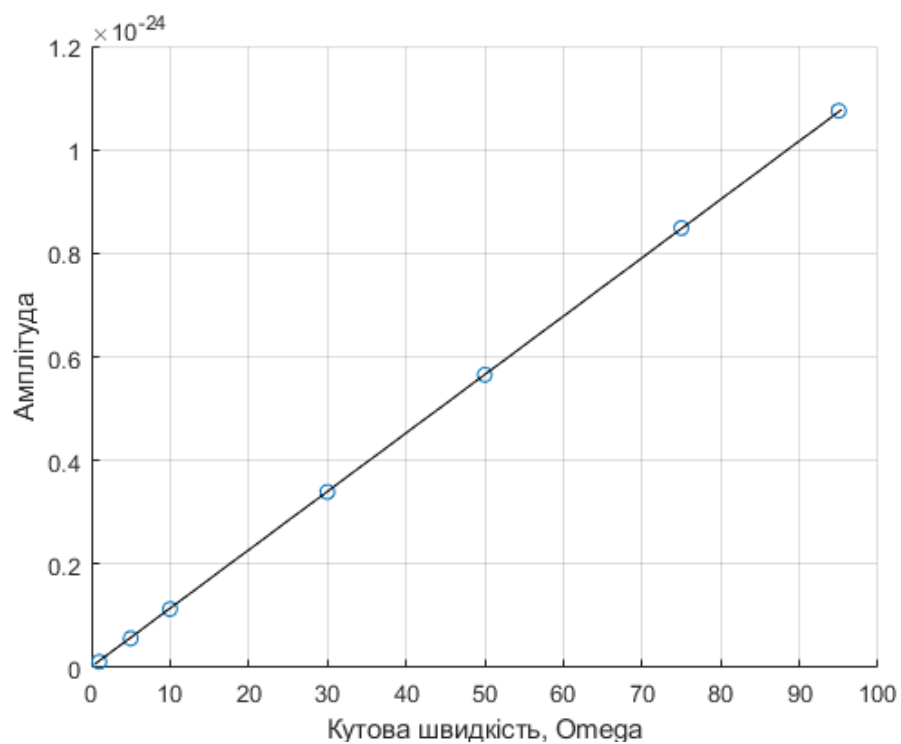


Рис. 3.9. Залежність амплітуди від кутової швидкості

Отже, як можна спостерігати з отриманого графіка, амплітуда коливання ЧЕ збільшується від збільшення кутової швидкості обертання основи  $\Omega$ , що відповідає роботі реального приладу.

По завершенню цих дослідів, можна стверджувати, що програмна модель адекватно вирішує поставлені задачі. Тепер можна перейти до наступного етапу, в якому проведемо дослідження даної моделі в умовах вібрації.

### 3.3. Дослідження програмної моделі ММГ RR-типу в умовах лінійної вібрації

Після моделювання рівняння руху ЧЕ ММГ та перевірки його на адекватність переходимо до досліджування системи під час вібрації.

Для цього будемо додавати в праву частину рівняння 2.11 момент  $M_x^H$ , обумовлений нерівножорсткістю підвісу і інерційними силами, що діють на ротор внаслідок віброприскорення  $W$ , що дорівнює:

$$M_x^H = F_z y - F_y z \quad (2.16)$$

Після додавання моменту  $M_x^H$  рівняння 2.11 буде мати наступний вид:

$$\ddot{\alpha} + \frac{b_\alpha}{J_\alpha} \dot{\alpha} + \frac{G_\alpha^*}{J_\alpha} \alpha = \dot{\gamma} \Omega_y + \frac{M_x^H}{J_\alpha} \quad (3.3)$$

Перепишемо рівняння 3.3 в формі Коші:

$$\ddot{\alpha} = (J_0 \dot{\gamma} \Omega_y + M_x^H - b_\alpha \dot{\alpha} - G_\alpha^* \alpha) / J_\alpha \quad (3.4)$$

До вже створеного рівняння, зображеного на рис. 3.2., потрібно додати  $M_x^H$ , повне рівняння якого буде мати вигляд:

$$M_x^H = \frac{m W_y W_z}{\omega_{z0}^2} \left( 1 - \frac{\omega_{z0}^2}{\omega_{y0}^2} \right), \quad (2.17)$$

а блок-схема Simulink для досліджень зображена на рис. 3.10:

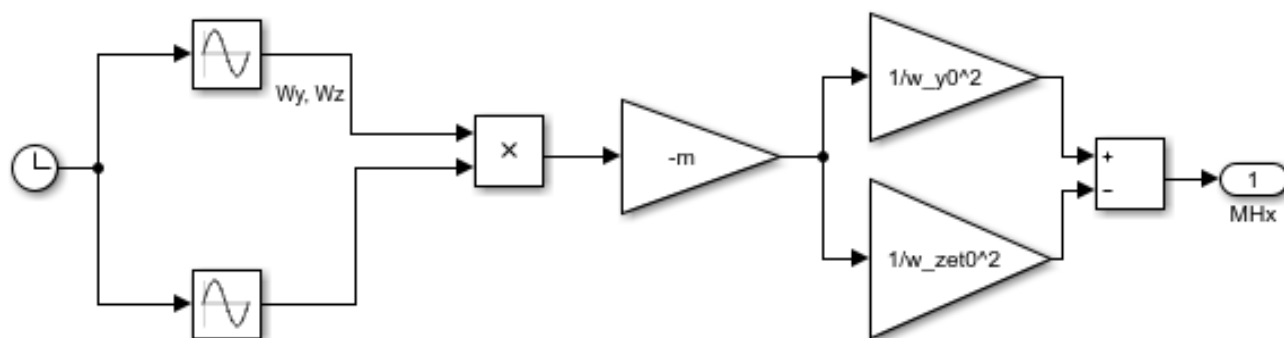


Рис. 3.10. Блок-схема для формування моменту  $M_x^H$ .

Для моделювання вібраційної похибки введемо обмеження на максимальну амплітуду вібрації  $W_0$  згідно формули 2.23[8]:

$$W_0 \leq \omega_{z0} \sqrt{\frac{H_0 \Omega_y}{K_{yz}^H m}} \leq 4.06 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{0.86 \cdot 10^{-10} \cdot 0.017}{1.2 \cdot 10^{-7}}} \leq 1.0977 \cdot 10^{-6}. \quad (3.5)$$

Проведемо дослідження поведінки ЧЕ при дії лінійної вібрації, врахувавши обмеження по амплітуді з виразу 3.5. Якщо амплітуда вібрації буде на порядок більшою, ніж у виразі 3.5, можна спостерігати на графіку зміщення амплітуди коливань. При умові, що жорсткість підвісу ЧЕ  $G_\alpha > G_\gamma$ , зміщення відбувається в позитивну сторону, при жорсткості підвісу ЧЕ  $G_\alpha < G_\gamma$ , навпаки – в негативну, що підтверджують моделювання, представлені на рис. 3.11 та 3.12 відповідно:



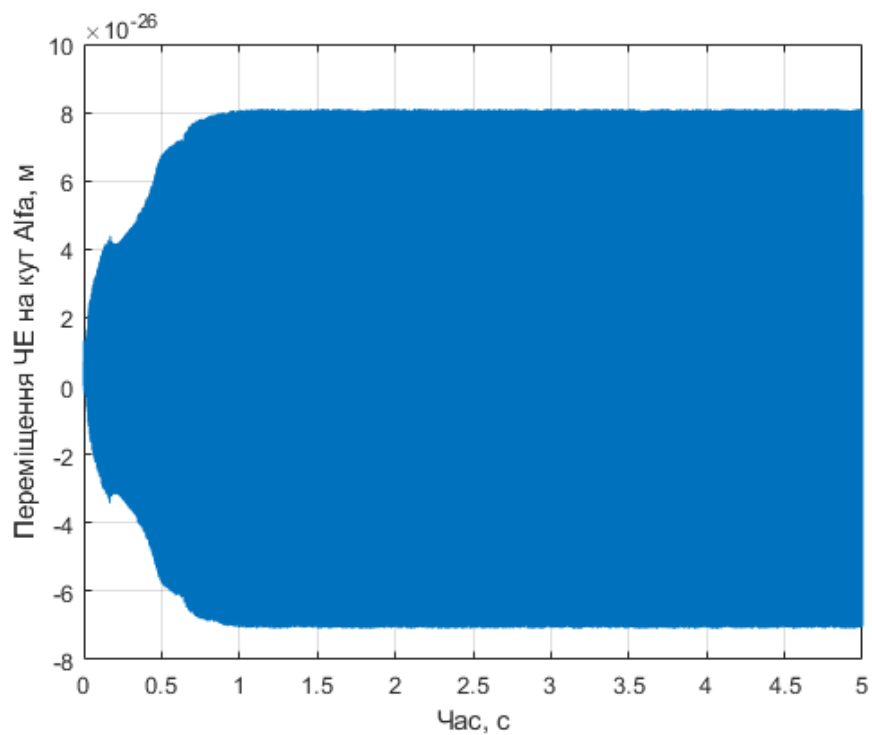


Рис. 3.11. Зміщення амплітуди при  $G_\alpha > G_\gamma$ .

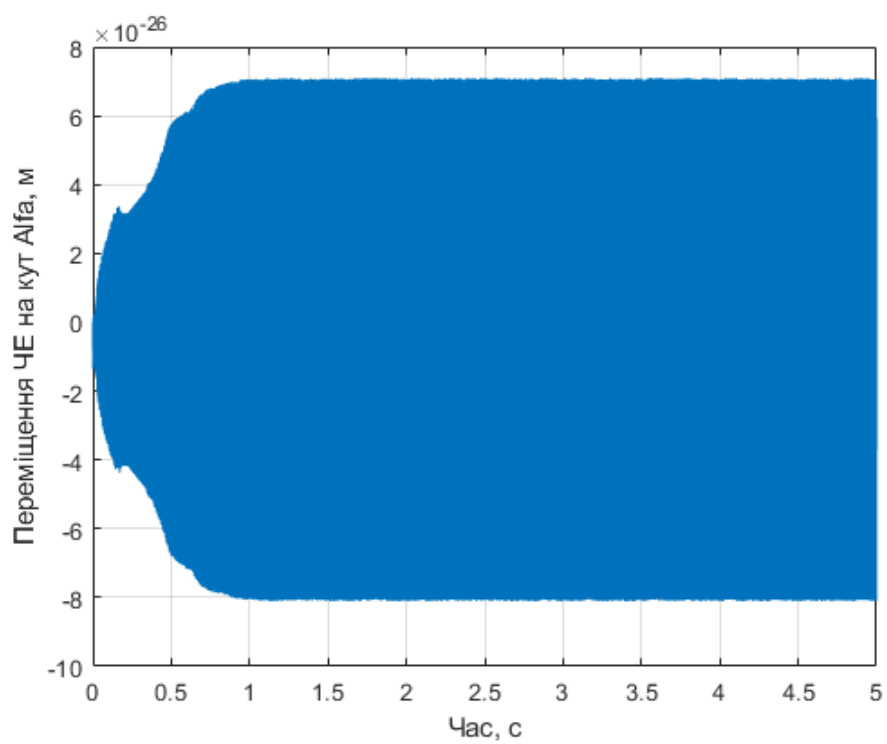


Рис. 3.12. Зміщення амплітуди при  $G_\alpha < G_\gamma$ .

Проаналізувавши результати, бачимо, що присутнє постійне зміщення відносно корисного сигналу, який вимірює амплітуду коливання по  $\alpha$  і відповідно кутову швидкість обертання основи  $\Omega$ .

Проведемо дослідження впливу частоти вібрації та її амплітуди на постійну складову зміщення сигналу. Проаналізуємо поведінку ЧЕ мікрогіроскопа по каналу  $\alpha$  при частоті вібрації 20 Гц, амплітуді вібрації  $1 \cdot 10^{-5}$  м та кутовій швидкості обертання основи 10 град/с, рис. 3.13:

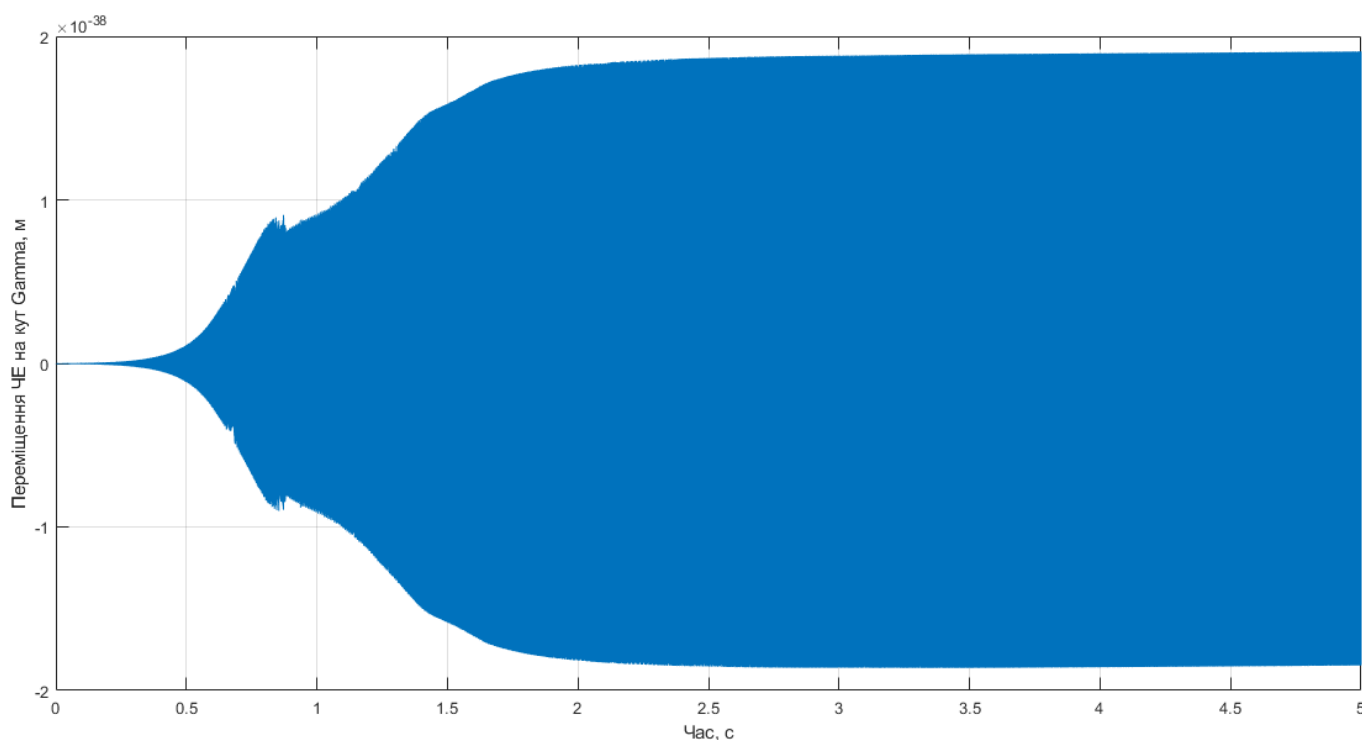


Рис. 3.13. Вихідний сигнал з каналу  $\alpha$ .

Аналізуючи графік, можна помітити постійне зміщення вихідного сигналу по каналу  $\alpha$  відносно нуля. Знайдемо точне зміщення за допомогою вбудованого додатку Curve Fitting Toolbox (більше відомий, як «cftool»[41]). Результат роботи програми представлено на рис. 3.14.

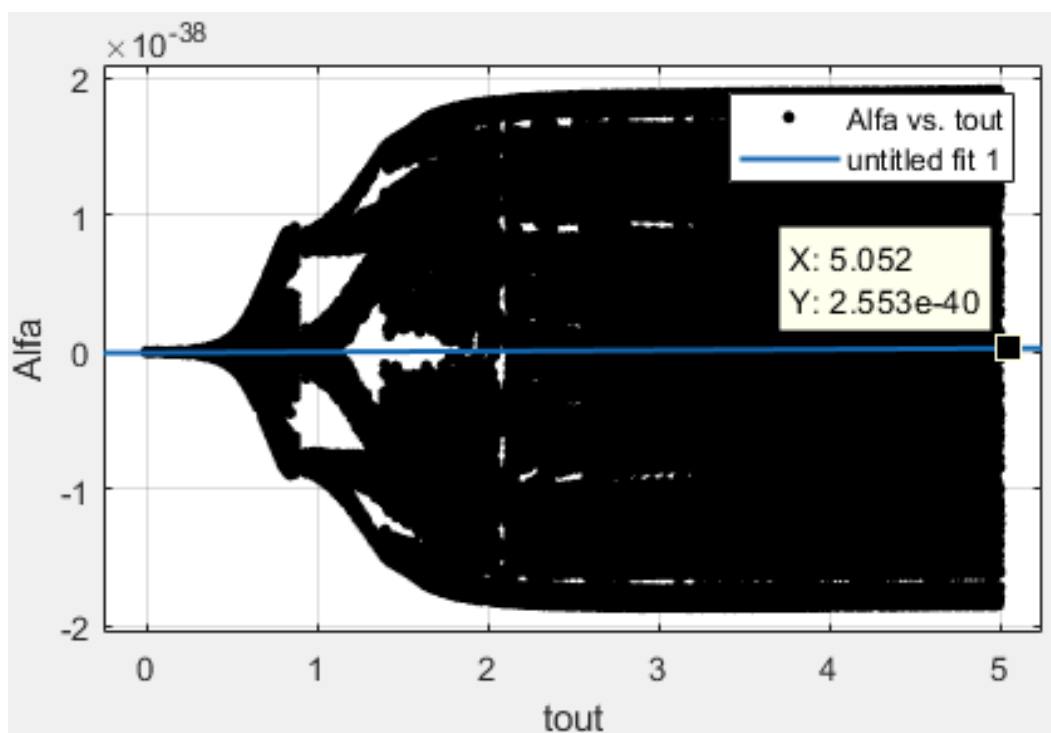


Рис. 3.14. Зміщення вихідного сигналу (синя пряма) по каналу  $\alpha$ .

Вплив частоти та амплітуди вібрації на величину зміщення сигналу за 5сек по каналу  $\alpha$  представлено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Частота вібрації 20 Гц,  $\Omega = 10$  град/с

№ Дослід	Амплітуда вібрації, м	Зміщення вихідного сигналу, м
1	0	0
2	$0.1 \cdot 10^{-4}$	$2.553e-40$
3	$0.5 \cdot 10^{-4}$	$6.642e-39$
4	$1 \cdot 10^{-4}$	$2.660e-38$
5	$2 \cdot 10^{-4}$	$1.064e-37$
6	$5 \cdot 10^{-4}$	$6.653e-37$
7	$8 \cdot 10^{-4}$	$1.703e-36$
8	$10 \cdot 10^{-4}$	$2.661e-36$

Після проведення дослідження, представимо графік залежності зміщення сигналу по вимірювальному каналу  $\alpha$  від амплітуди вібрації  $\omega_v$  рис. 3.15.

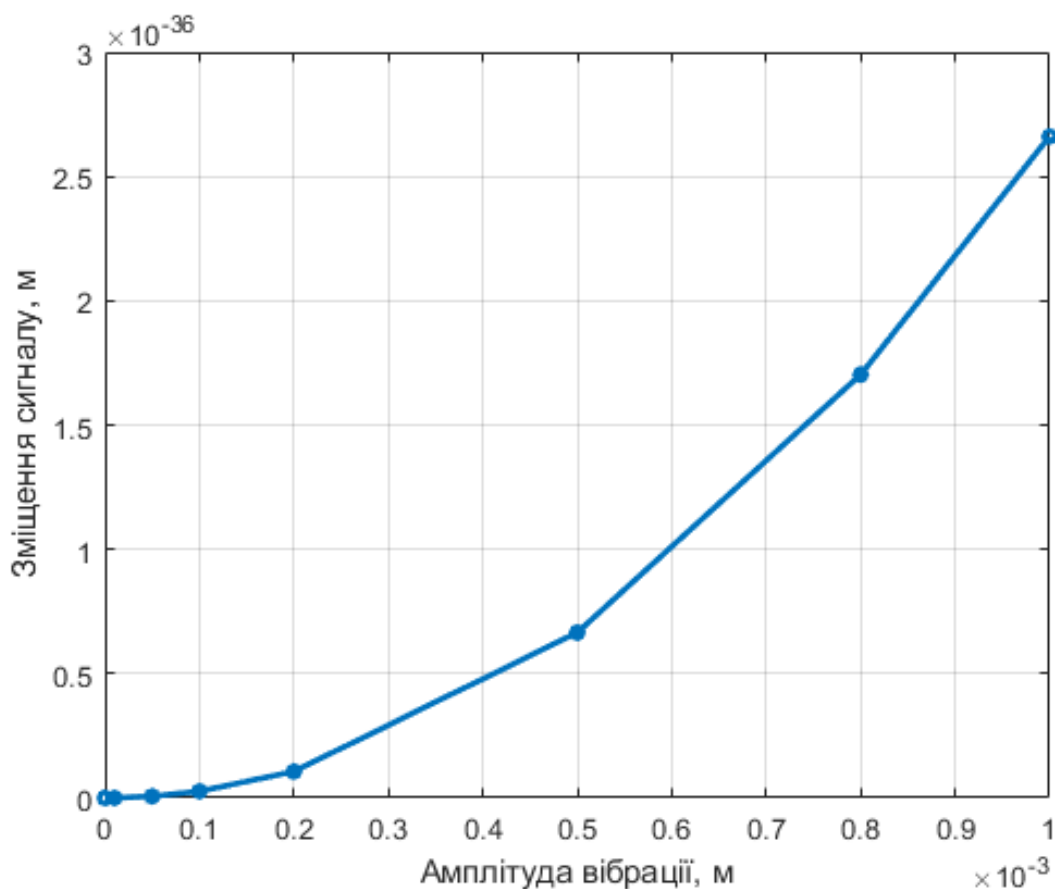


Рис. 3.15. Постійна складова зміщення без компенсації впливу вібрації.

Проаналізувавши результати, можна стверджувати, що при збільшенні амплітуди вібрації збільшується значення постійної складової похибки.

Проведемо аналогічні дослідження, при зміні частот вібрації в діапазоні до 2000 Гц. Результати наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Частота вібрації 2000 Гц,  $\Omega = 10$  град/с

№ Досліду	Амплітуда вібрації, м	Постійна зміщення вихідного сигналу, м
1	0	0
2	$0.1 \cdot 10^{-4}$	$2.553e-40$
3	$0.5 \cdot 10^{-4}$	$6.642e-39$
4	$1 \cdot 10^{-4}$	$2.662e-38$
5	$2 \cdot 10^{-4}$	$1.064e-37$
6	$5 \cdot 10^{-4}$	$6.653e-37$
7	$8 \cdot 10^{-4}$	$1.705e-36$
8	$10 \cdot 10^{-4}$	$2.661e-36$

Представимо результати табл.3.1 у вигляді графіка рис. 3.16.

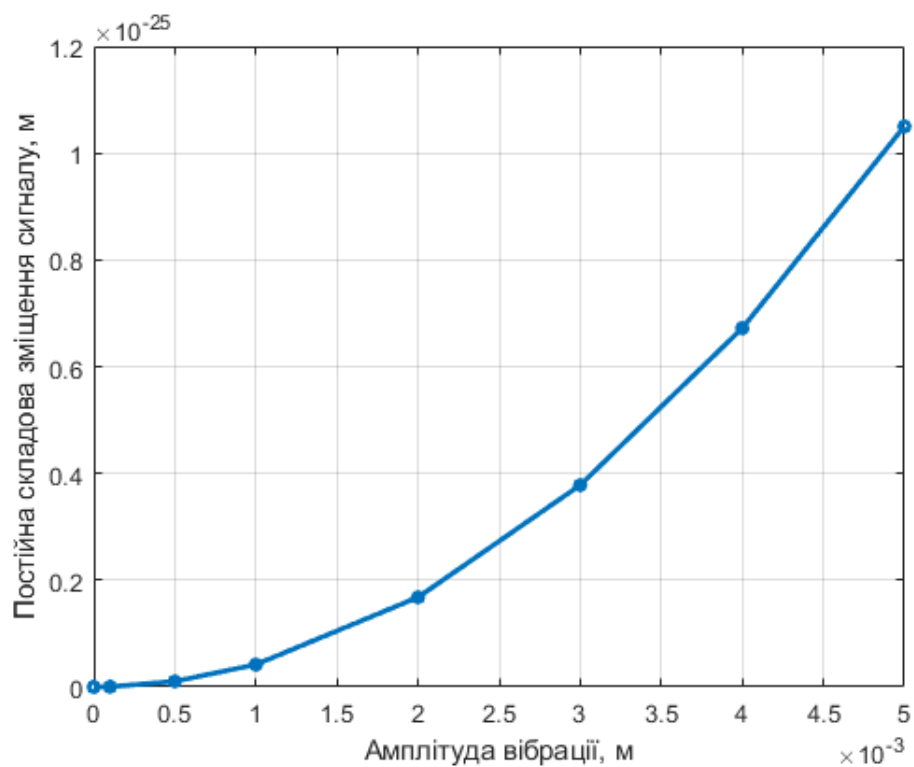


Рис. 3.16. Зміщення амплітуди при  $\omega_b = 2000$  Гц та швидкість обертання основи  $\Omega = 10$  град/с.

Після проведення досліджень, можна зробити висновки, що постійна складова похибки збільшується в обох випадках від збільшення амплітуди вібрації  $W$ , і практично не залежить від частоти вібрації  $\omega_B$ .

### 3.4. Проведення досліджень ММГ RR-типу з контуром компенсації вібрації

Провівши дослідження впливу вібрації на мікромеханічний гіроскоп RR-типу, можна оцінити похибку при компенсації впливу вібрації методом, описаним вище в пункті 2.3.

Використавши додаткові акселерометри, для виміру амплітуди вібрації по осям  $Oz$  та  $Oy$ , отримаємо додаткову інформацію для компенсації постійного зміщення вихідного сигналу з каналу  $\alpha$ , необхідну для моделювання ефективності компенсації вібраційної похибки ММГ.

На рис 3.17. зображено загальну схему ММГ з контуром компенсації дії вібрації.

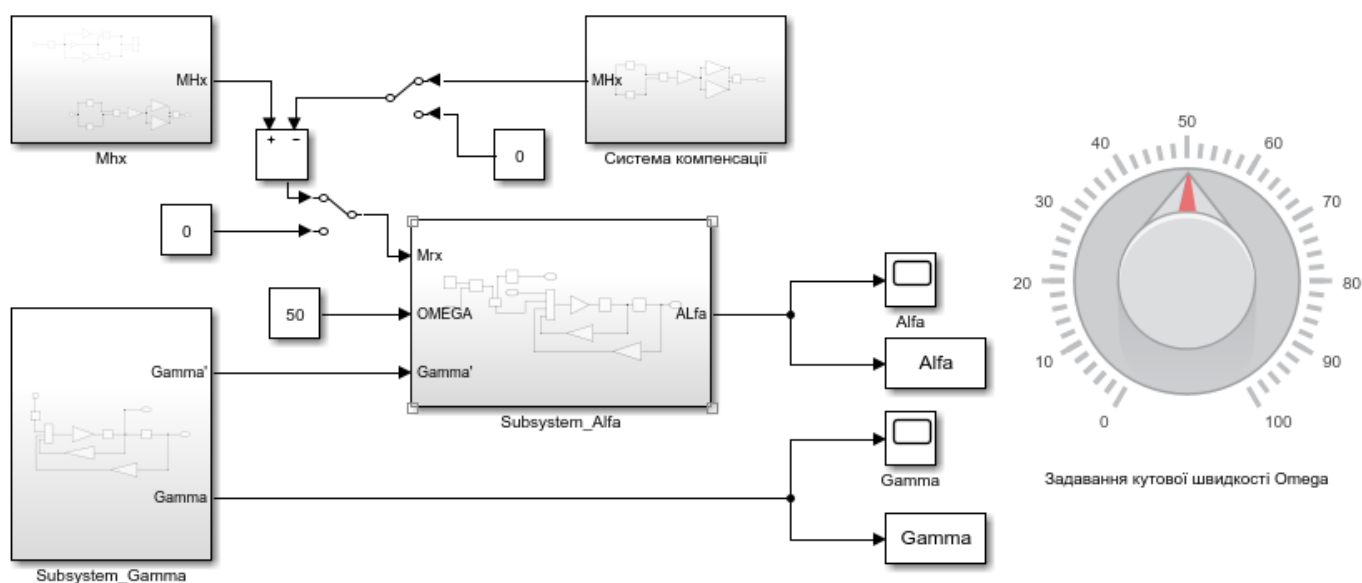


Рис. 3.17. Схема компенсації вібраційної похибки ММГ

Проведемо дослідження ефективності компенсації похибки ММГ при різних параметрах вібрації. Оцінимо похибку компенсації. Результати представлено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Результати дослідження компенсації вібраційної похибки ММГ при частоті вібрації 20 Гц,  $\Omega = 10$  град/с

№ Досліду	Амплітуда вібрації, м	Зміщення амплітуди при компенсації вібрації
1	0	0
2	$0.1 \cdot 10^{-4}$	-1.140e-41
3	$0.5 \cdot 10^{-4}$	-2.418e-41
4	$1 \cdot 10^{-4}$	-6.412e-41
5	$2 \cdot 10^{-4}$	-2.239e-40
6	$5 \cdot 10^{-4}$	-1.342e-39
7	$8 \cdot 10^{-4}$	-3.419e-39
8	$10 \cdot 10^{-4}$	-5.336e-39

Побудуємо графік залежності зміщення вихідного сигналу по вимірювальному каналу  $\alpha$  від амплітуди вібрації  $\omega_b$  з контуром компенсації рис. 3.18.

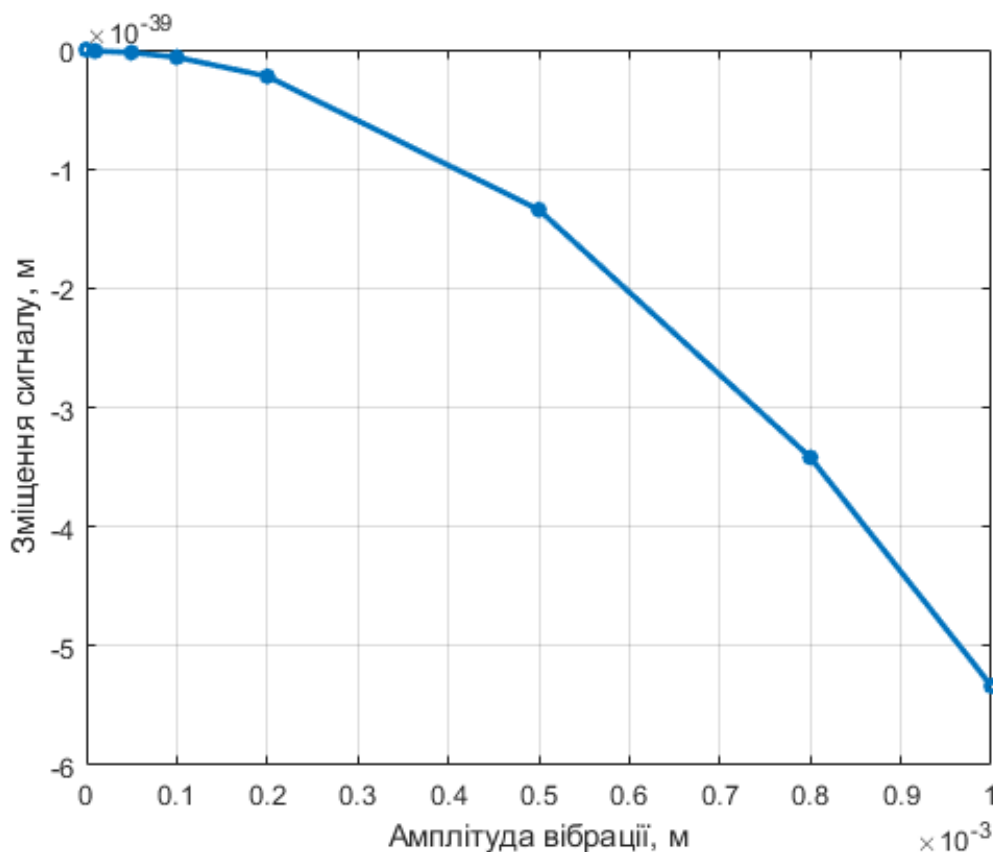


Рис. 3.18. Постійна складова зміщення з контуром компенсації при  $\omega_b = 20$  Гц , швидкість обертання основи -  $\Omega = 10$  град/с.

Оскільки частота вібрації майже не впливає на постійну складову похиби, то повторимо дослід при кутовій швидкості обертання основи  $\Omega = 50$  град/с, результати представлені в таблиці 3.5. та на рис. 3.19.

Таблиця 3.5. Результати дослідження похибки ММГз контуром компенсації при частоті вібрації 20 Гц ,  $\Omega = 50$  град/с

№ Досліду	Амплітуда вібрації, м	Похибка без компенсації вібрації	Похибка з компенсацією вібрації
1	0	0	0
2	$0.1 \cdot 10^{-4}$	2.118e-40	-5.485e-41
3	$0.5 \cdot 10^{-4}$	6.599e-39	-6.763e-41
4	$1 \cdot 10^{-4}$	2.656e-38	-1.076e-40
5	$2 \cdot 10^{-4}$	1.064e-37	-2.673e-40



6	$5 \cdot 10^{-4}$	$6.653e-37$	$-1.368e-39$
7	$8 \cdot 10^{-4}$	$1.703e-36$	$-3.462e-39$
8	$10 \cdot 10^{-4}$	$2.661e-36$	$-5.38e-39$

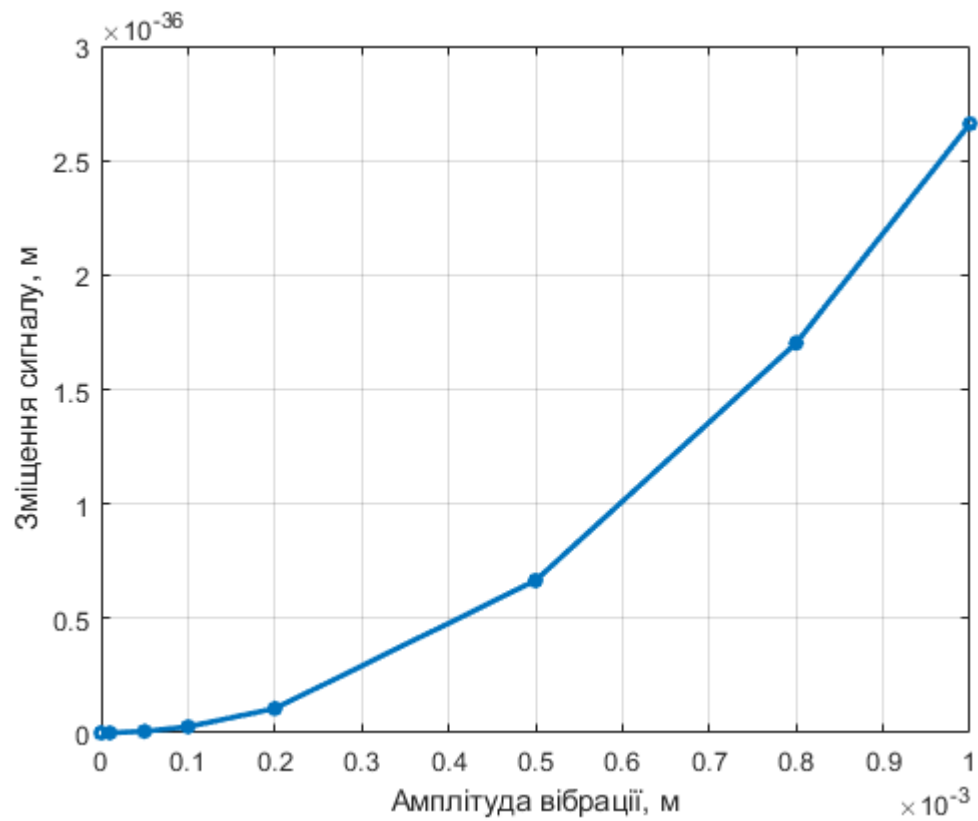


Рис. 3.19 а. Залежність зміщення вихідного сигналу ММГ з контуром компенсації від амплітуди вібрації.

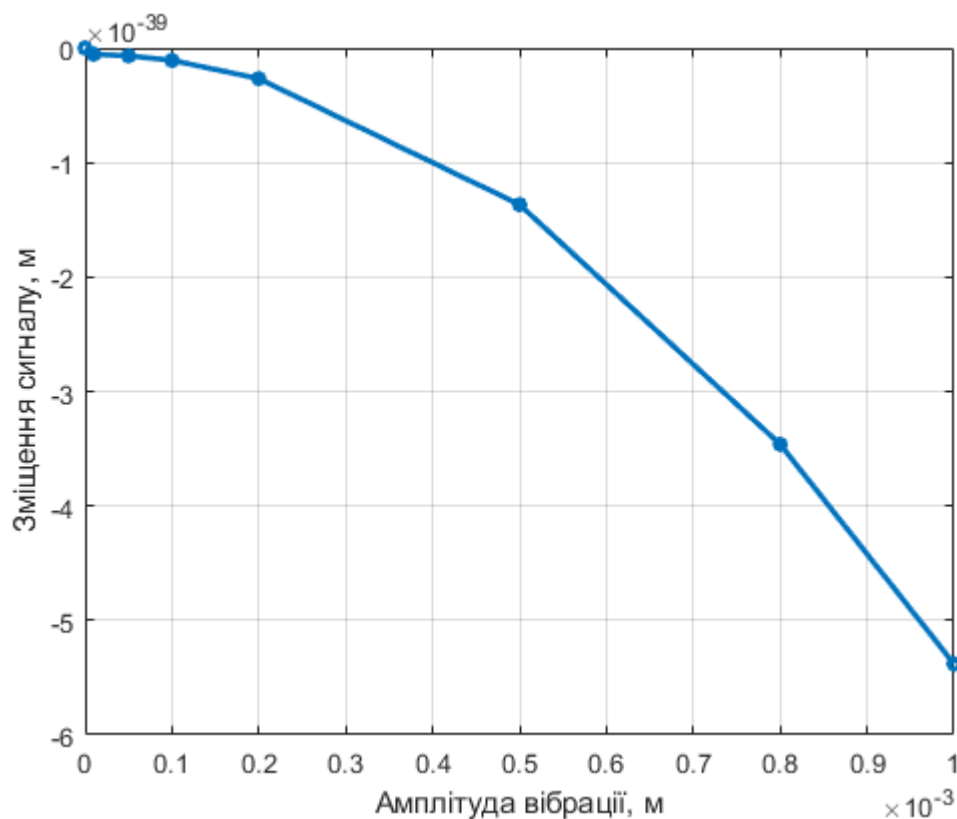


Рис. 3.19 б. Залежність зміщення вихідного сигналу ММГ з компенсацією від дії вібрації.

Отже, можна зробити висновок, що введення контуру компенсації дії вібрації в схему ММГ дозволяє суттєво підвищити точність мікромеханічних гіроскопів. Ефективність компенсації вібраційної похибки суттєво залежності від амплітуди вібрації та точності акселерометрів.

### Висновки до розділу

1. В даному розділі було побудовано програмну модель для аналізу системи диференціальних рівнянь ММГ RR-типу в середовищі MATLAB, використовуючи пакет Simulink.
2. Проведена оцінка на адекватність даної моделі при різних початкових умовах: по осі  $\alpha$ , а потім по осі  $\gamma$ . В обох випадках спостерігались затухаючі коливання, що цілком відповідає фізичним уявленням роботи приладу.
3. Проведено дослідження впливу амплітуди коливань ЧЕ при різній кутовій швидкості обертання основи та визначено, що амплітуда збільшується за

лінійним законом від збільшення швидкості обертання основи, як показано на рис. 3.9.

4. Було проведено дослідження поведінки програмної моделі ММГ в умовах лінійної вібрації; для цього в праву частину рівняння по каналу  $\alpha$  додавався момент  $M_x^H$ , до складу якого було включено вібраційне переміщення по осі Oz та Oy.
5. При зміні частоти вібрації від 20 Гц до 2 кГц було встановлено, що на амплітуді коливань ЧЕ це практично не впливає.
6. Коефіцієнти жорсткості  $G_\alpha$  та  $G_\gamma$  суттєво впливають на зміщення амплітуди коливання ЧЕ відносно нуля: у випадку  $G_\alpha > G_\gamma$  амплітуда коливань зміщується в позитивну сторону від нуля, навпаки, при  $G_\alpha < G_\gamma$  - в негативну сторону від нуля.

Визначено зміщення амплітуди коливань за допомогою додатка MATLAB Curve Fitting Toolbox .

7. Завершальним етапом в моделюванні ММГ RR-типу стало залучення в схему ММГ контуру компенсації вібрації. Дослідження показали, що використання контуру може суттєво підвищити точність приладу.

## ВИСНОВКИ

1. В роботі проаналізовано стан і перспективи методу використання додаткової інформації для підвищення точності приладів орієнтації і навігації в умовах вібрації. Детально вивчено сучасні підходи для забезпечення стійкості вимірювачів СОН, в тому числі розглянуто інтелектуалізацію приладів СОН, як ефективний засіб підвищення їх інформаційних характеристик.
2. Обрано конструктивну схему побудови ММГ RR-типу для подальшого використання її при дослідженнях. Проведено спрощення рівнянь руху ЧЕ та розроблено програмну модель ММГ в умовах лінійної вібрації для обраної схеми.
3. Проведено моделювання поведінки ЧЕ ММГ RR-типу в середовищі MATLAB Simulink в умовах вібрації. Перевірено модель на адекватність та представлено результати моделювання.
4. Проаналізовано зміщення амплітуди коливань ЧЕ при дії вібрації та виявлено ефективність компенсації цього зміщення в залежності від амплітуди вібрації основи.
5. В розділі 4 було проаналізовано можливий вихід на ринок нового ММГ RR-типу з структурно-алгоритмічною компенсацією вібраційної похибки. Було проведено аналіз конкурентів, потреби споживачів, виявлено слабкі та сильні сторони приладу. Представлено можливий план подальшого розвитку проекту після запуску у виробництво приладу та початку продажів. Було оцінено рентабельність проекту, що відіграє ключову роль для потенційних інвесторів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные / Стандартиформ. // Национальный стандарт Российской Федерации. – 2014.
2. Фраерман А.И. Экспертная система по базе знаний предметной области технологий микро- и наносистем / Фраерман А.И.. – 2012
3. А. В. Чечкин. Интеллектуализация сложной системы как средство обеспечения её информационно-системной безопасности / А. В. Чечкин, М. В. Пирогов., 2009.
4. Мейтус В. Ю. Интеллектуализация информационных технологий [Электронный ресурс] / Владимир Юльевич Мейтус. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <http://po-teme.com.ua/informatika/stati-po-informatike/1657-intellektualizatsiya-informatsionnykh-tekhnologij.html>.
5. Избыточность информации [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <http://poznayka.org/s24310t1.html>.
6. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений – стратегическая теория XXI века // Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2007 - спецвипуск. Науково-технічний журнал. Черкаси: ЧДТУ, 2007. – с. 120-122.
7. В.Т.Кондратов. теория избыточных измерений – теория Мирового значения / В.Т.Кондратов. // Институт кибернетики им. В.М.Глушкова НАН Украины. – 2012.
8. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
9. «Перспективні технології та прилади» // м. Луцьк травень 2013 р. – Луцьк: ЛНТУ, 2012. - 168 с.
10. М. И. Евстифеев. Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям [Электронный ресурс] / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев, И. Б. Челпанов. – 2014.
11. Р.Г. Люкшонков. Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре / Р.Г. Люкшонков, Н.В. Моисеев // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011.

12. Патент РФ № 2289789, МПК G 01 C 19/56, G 01 P 9/04. Устройство измерения перемещения подвижной массы микромеханического гироскопа по оси первичных колебаний / Некрасов Я.А.; заявитель ФГУП «ЦНИИ «Электроприбор». – № 2005130466/28; заявл. 23.09.05; опубл. 20.12.06, Бюл. № 35. – 8 с.
13. Матвеевский В. Р. Концепция интеллектуализации измерительных комплексов в системах автоматизации технологических процессов / Матвеевский В. Р., Шатунова К. В.. // Информатизация образования и науки. – 2010. – С. 100–103.
14. Проведение компьютерного контроля автоматических систем регулирования / О.А. Юланов, В.В. Леснов, В.М. Гладченко, И.В. Леснов // Электрические станции. - 2005. - №9.
15. Пронин А.Н., Сапожникова К.В., Тайманов Р.Е. Достоверность измерительной информации в системах управления. Проблемы и решения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. Том. 9. – №3. – С. 32-37.
16. Taymanov R., Sapozhnikova K. Metrological self-check and evolution of metrology // Measurement. – 2010. – Vol.43. – № 7.– Pp. 869-877.
17. Фирсов С.Н. Забезпечення функціональної стійкості вимірювачів параметрів руху супутникових систем стабілізації і орієнтації // Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2013. № 1 – С. 144 – 150.
18. Вавилов, В.Д. Теоретические основы микромеханических акселерометров и гироскопов: Учебное пособие / В.Д. Вавилов. - Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники для студ. спец. 200103 «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы», 200106 «Информационно-измерительная техника и технологии». - Н.Новгород : НГТУ, 2011
19. Патент РФ № 2289789, МПК G 01 C 19/56, G 01 P 9/04. Устройство измерения перемещения подвижной массы микромеханического гироскопа по оси первичных колебаний / Некрасов Я.А.; заявитель ФГУП «ЦНИИ

«Электроприбор». – № 2005130466/28; заявл. 23.09.05; опубл. 20.12.06, Бюл. № 35.– 8 С.

20. Копысов Олег Эдуардович. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ И АКСЕЛЕРОМЕТРЫ / Копысов Олег Эдуардович. // Авионика Аэронавигация. – 2012. – №11.
21. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. №1. С. 3–16.
22. Лестев А.М., Попова И.В., Евстифеев М.И., Пятышев Е.Н., Лурье М.С., Семенов А.А. Особенности микромеханических гироскопов // Микросистемная техника. 2000. №4. С. 16–18.
23. Barbour N., Hopkins R., Kourepenis A. Inertial MEMS system applications // Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. 2004. V. 232. P. 7-1–7-12.
24. Geen J. Progress in integrated gyroscopes // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2004.05.19.N11.P.12–17.doi:10.1109/MAES.2004.1365660
25. Weinberg H. Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter. Technical Article MS-2158. Analog Devices, Inc, 2011. P. 1–5.
26. Nguyen C. The Harsh Environment Robust Micromechanical Technology (HERMiT) program: success and some unfinished business // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2012. Art. 6259750. doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259750
27. Евстифеев М.И., Челпанов И.Б. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях // Гироскопия и навигация. 2013. №1(80). С. 119–133.
28. М.И. Евстифеев, А.А. Унтилов. Особенности конструирования чувствительного элемента микромеханического гироскопа / М.И. Евстифеев, А.А. Унтилов. // системы ориентации и навигации. – №7. – С. 243–256.
29. Камертонный микрогироскоп. // Патент РФ №2580871.

30. Збруцкий А.В., Кисilenко С.П., Коржевин Д.А. Собственные колебания микромеханического вибрационного гироскопа // Респ. междувед. Научно-техн. Сб. “Механика гироскопических систем”. - Киев. - 1993. - Вып. 12. - С. 86-92.
31. Збруцкий А.В., Кисilenко С.П., Шахов С.А. Частотные характеристики динамически симметричного микромеханического вибрационного гироскопа // Респ. междувед. научно-техн. сб. “Механика гироскопических систем”. - Киев. - 1993. - Вып. 12. - С. 93-99.
32. Doronin V.P., Kharlamov S.A., Khromov B.V., Neapolitansky A.S., Novikov L.Z., Zhanov Yu.K. Operation principle and basic errors of vibratory gyroscopes as rotation angle measuring device // 4-th St. Petersburg international conference on integrated navigation systems. - St. Petersburg. - 1997. - P. 337-346.
33. Апостолук В. А. Динамика и погрешности микромеханических гироскопов : дис. канд. техн. наук : 05.11.03 / Апостолук Владислав Александрович – Київ, 1999. – 168 с.
34. М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев. Имитационное моделирование динамики ммг на вибрирующем основании / М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев. – 2017.
35. Рентабельність виробництва і методика визначення її показників [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://buklib.net/books/29473/>.
36. Рейтинг депозитов физ. лиц [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://minfin.com.ua/deposits/>.
37. Прогнозування ефективності інвестиційного проекту [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://pidruchniki.com/1566072162240/turizm/prognozuvannya\\_efektivnosti\\_investitsiynogo\\_proektu](https://pidruchniki.com/1566072162240/turizm/prognozuvannya_efektivnosti_investitsiynogo_proektu).
38. Зміст стратегічного аналізу середовища підприємства [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://pidruchniki.com/1974070454048/menedzhment/strategichniy\\_analiz\\_pidpriyemstva](http://pidruchniki.com/1974070454048/menedzhment/strategichniy_analiz_pidpriyemstva).



39. Матвеев В. В., Серегин С. И., Лихошерст В. В. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ RR-ТИПА. 2012. Системы ориентации, стабилизации и навигации.
40. Антонюк В. С. Методологія наукових досліджень/ навч. Посіб./ В.С. Антонюк, Л.Г. Полонський, В.І. Аверченков. Ю.А. Малахов. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 276 с.
41. Curve Fitting Toolbox [Електронний ресурс] // mathworks. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/>.

## ДОДАТОК А

Код програми m-файла для задавання початкових умов та параметрів моделі ММГ

```
% Математична модель ММГ RR-типу виконана для дисертаційної роботи
% студента VI курсу ПБФ, кафедри ПСОН
% Кльосова Юрія Ігоровича
% Лістинг програми для запису необхідних коефіцієнтів в робочий
% простір
clc, clear all

g = 9.8106;
m = 2e-7;      % кг
H = 0.86e-10;  % кг*м2/с
J0 = 2.5e-13;  % кг*м2

M_0 = 2.37e-10; % амплітуда відносно осі оу
p = 1.88e4;     % частота відносно осі оу

ksi_gamma = 1e-4;      % коефіцієнт затухання

G_gamma = 43.38e-2; % жорсткість пружних елементів підвісу наружної рамки на кручення
відносно осі первинних коливань
J_gamma = 2.5e-8; % момент інерції внутрішньої рамки відносно осі оу
w_gamma = sqrt(G_gamma/J_gamma); % кругова частота власних незатухаючих коливань
b_gamma = 2*ksi*J_gamma*w_gamma; % коефіцієнт демфування навколо осі оу

ksi_alfa = 0.05;

G_alfa = 23.8e-2;
J_alfa = 10e-8;
w_alfa = sqrt(G_alfa/J_alfa);
b_alfa = 2*ksi_alfa*J_gamma*w_gamma;

w_zet0 = 4.06e4;      % 6458 Гц
w_y0 = 8.17e4;

Gy = 1e-12;           % жорсткість пружного підвісу відносно осі у
Gz = 1e-13;

w = 20 * 6.2832;      % Частота вібрації 20...2000 Гц в рад/с
W0 = 10e-2;

wy2 = 1/w_y0^2;
wz2 = 1/w_zet0^2;
w_sum = wy2 - wz2;
```